FIZICA

PENTRU TOȚI

L. D. LANDAU
A. I. KITAIGORODSKI

L. D. LANDAU • A. I. KITAIGORODSKI

FIZICA PENTRU TOȚI

Mișcare • Căldură

EDITURA ȘTIINȚIFICĂ • BUCUREȘTI, 1965

Notă

Autorii lucrării de față — academicianul L. D. Landau, laureat al Premiului Lenin și al Premiului Nobel, și profesorul A. I. Kitaigorodski — expun sub formă ușor de înțeles elementele de fizică generală.

Un aspect semnificativ al „Fizicii pentru toți" îl constituie faptul că structura atomică a materiei, teoria mareelor, teoria undelor de șoc, teoria heliului lichid și alte asemenea probleme sînt expuse împreună cu capitolele clasice ale mecanicii și căldurii. Această legătură strînsă între problemele de actualitate ale fizicii și noțiunile clasice ale acesteia, condiționarea lor reciprocă și contradicțiile inevitabile care ies din cadrul noțiunilor clasice formează caracterul fundamental al modului modern de a aborda studiul fizicii.

Expunerea nouă și atrăgătoare face ca această lucrare să fie utilă pentru un cerc larg de cititori.

Supracoperta și coperta de Tudor Mironescu

Prefață

Prima întrebare pe care și-o va pune cititorul cînd va lua acest volum în mînă va fi, probabil: cine sînt aceia la care se referă cuvintele „pentru toți"?

Fireşte că în această expresie este o parte de exagerare. De fapt cititorul trebuie să aibă cunoștințe de algebră elementară, care se învață în școala medie. De cunoștințe de fizică nu e nevoie: această carte poate fi primul manual de fizică al dumneavoastră. Este posibil însă ca el să fie interesant și pentru aceia care au ales fizica ca specialitate.

Ne-am străduit să scriem această carte într-un limbaj ușor și simplu și nu ne-am refuzat plăcerea de a glumi pe ici pe colo cu cititorul. Aceasta însă nu înseamnă nicidecum că Fizica pentru toți *este o carte ușoară. Multe din paginile ei trebuie citite pe îndelete și cu atenție; pentru a pricepe fizica, de foarte multe ori este necesar să gîndim cu cea mai mare profunzime.*

În lucrare s-a pus accentul principal pe legile și noțiunile fundamentale ale fizicii. Am căutat însă să nu neglijăm ilustrațiile din viață și tehnică, ce-i drept, fără a ne propune să intrăm în domeniul inepuizabil al aplicațiilor fizicii.

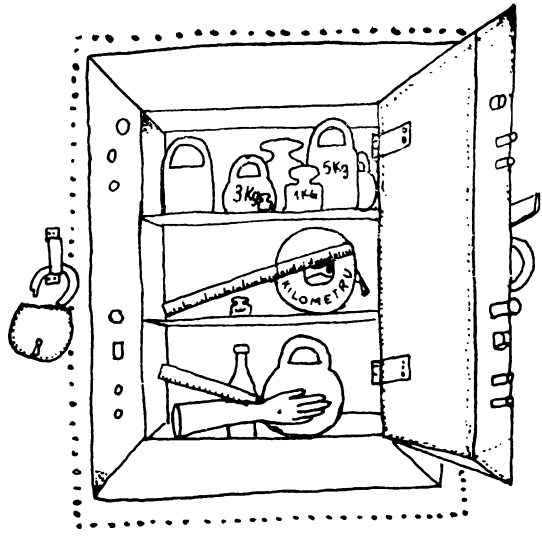
Un mic număr de digresiuni istorice sînt consacrate exclusiv fundamentelor fizicii, dar nu şi aplicaţiilor sale.

Deocamdată, Fizica pentru toţi *cuprinde numai partea fizicii referitoare la mişcarea mecanică şi moleculară. Nădăjduim ca în viitor să punem la dispoziţia cititorului, sub acelaşi titlu, volumele următoare, consacrate electricităţii, opticii şi structurii atomului.*

L. LANDAU, A. KITAIGORODSKI

I

Noțiuni fundamentale



Centimetrul și secunda

Oricine poate dori uneori să măsoare o lungime, să socotească timpul și să cîntărească diferite corpuri. De aceea, toți știu perfect ce este centimetrul, secunda și gramul. Pentru fizician însă aceste măsurări au o deosebită importanță, căci ele sînt necesare pentru studierea majorității fenomenelor fizice. Oamenii caută să măsoare cît mai precis distanța, intervalele de timp și greutatea, adică așa-numitele mărimi fundamentale.

Aparatele moderne de fizică permit să se determine diferența de lungime dintre două etaloane de metal ale metrului, chiar dacă această diferență este mai mică decît a miliarda parte dintr-un metru. Se pot distinge intervale de timp care diferă între ele cu a milioana parte dintr-o secundă. Balanțele bune stabilesc cu foarte mare precizie greutatea unei semințe de mac.

Tehnica măsurărilor a început să se dezvolte abia acum cîteva sute de ani și relativ foarte recent s-a convenit ce segment de lungime și greutatea cărui corp să fie luate ca unitate.

De ce însă s-a ales ca centimetru și ca secundă mărimile pe care le cunoaștem? E clar că dacă centimetrul și secunda ar fi mai lungi, acest lucru n-ar avea prea mare importanță.

Unitatea de măsură trebuie să îndeplinească o singură condiție: să fie comodă. Dacă unitatea de măsură se găsește la îndemînă este cu atît mai bine; cel mai simplu lucru ar fi să se ia ca unitate

de măsură chiar mîna. De altfel, chiar așa s-a procedat în vechime; dovadă sînt înseși denumirile unităților, de pildă, „cotul" — distanța de la cot pînă la vîrful degetelor mîinii întinse — sau „degetul" — lățimea degetului celui mare la baza sa. Pentru măsurarea lungimilor se mai folosea și piciorul — de unde denumirea de „picior" (în englezește *foot*) a lungimii tălpii.

Deși aceste unități sînt foarte comode, aflîndu-se totdeauna la îndemînă, ele prezintă totuși și neajunsuri evidente, căci oamenii se deosebesc prea mult unii de alții pentru ca mîna sau piciorul să poată servi ca unități de măsură care să nu dea loc la discuții.

O dată cu dezvoltarea comerțului, s-a ivit necesitatea de a se conveni asupra unor unități de măsură acceptate de toți. S-au stabilit etaloane de lungime și greutate, mai întîi în cadrul unui tîrg, apoi pentru un oraș, după aceea pentru toată țara și, în sfîrșit, pentru toată lumea. Se numește etalon o măsură servind ca model, de exemplu, o riglă sau o greutate de metal. Statul păstrează cu grijă etaloanele, iar celelalte greutăți de metal sau rigle trebuie să fie confecționate riguros după aceste etaloane.

Unele distanțe se exprimă în unități mai mari, altele — în unități mai mici. Într-adevăr, n-o să exprimăm distanța de la Moscova la Leningrad în centimetri, nici greutatea unei garnituri de tren în grame. De aceea, oamenii au convenit asupra unui anumit raport între unitățile mari și cele mici. După cum se știe, în sistemul de unități de care ne servim, unitățile mari diferă de cele mici de 10, 100, 1 000 de ori și, în general, de un număr de ori egal cu o putere oarecare a lui 10. Această convenție este foarte practică și simplifică toate calculele. Acest sistem comod n-a fost însă adoptat în toate țările. În Anglia și S.U.A, pînă acum, nu se folosește decît rareori metrul, centimetrul și kilometrul, după cum nu se face uz nici de gram și kilogram[1], cu toate că avantajele sistemului metric sînt evidente.

În secolul al XVII-lea s-a născut ideea de a se alege un etalon care să existe în natură și să nu varieze cu trecerea anilor și a veacurilor. În anul 1664, Christian Huygens a propus să se ia ca unitate de lungime lungimea unui pendul care efectuează o oscilație

---

[1] În Anglia au fost adoptate în mod oficial următoarele unități de măsură pentru lungime: mila marină (egală cu 1 852 m), mila simplă (1 609 m) și piciorul (30,5 cm); un picior este egal cu 12 țoli, iar un țol are 2,54 cm; yardul are 0,91 cm. Acesta din urmă este o unitate de măsură a „croitorilor", căci în yarzi se obișnuiește să se măsoare cantitatea de stofă necesară pentru un costum.

În țările anglo-saxone, greutatea se măsoară în funți (1 funt = 454 g). Fracțiunile de funt sînt uncia (1/16 funt) și gramul (1/7 000 funt); de aceste unități se servesc farmaciștii la cîntărirea medicamentelor.

pe secundă. Cam cu o sută de ani mai tîrziu, în 1771, s-a propus ca etalon de lungime distanța pe care o parcurge într-o secundă un corp în cădere liberă. Ambele variante însă erau incomode și de aceea nici una nu a fost adoptată. A fost nevoie de o revoluție pentru ca să apară unitățile de măsură moderne; kilogramul și metrul au fost create de Marea Revoluție Franceză.

În anul 1790, Adunarea Constituantă a Franței a numit pentru elaborarea unităților de măsură o comisie specială, din care făceau parte cei mai reputați fizicieni și matematicieni. Dintre toate variantele de unități de lungime propuse, această comisie a ales a zecea milioana parte dintr-un sfert de meridian pămîntesc și a dat acestei unități numele de „metru". În anul 1799 s-a confecționat etalonul de lungime, metrul, și s-a dat în păstrare la arhivele Republicii.

În scurt timp însă s-a constatat că ideea justă în abstract a alegerii unităților de măsură model împrumutate din natură, idee care părea cea mai practică, nu este pe deplin realizabilă. Măsurările mai precise făcute în secolul al XIX-lea au arătat că etalonul metrului confecționat în Franța era cu circa 0,08 mm mai scurt decît a patruzecea milioana parte din meridianul pămîntesc. Era evident că, pe măsură ce tehnica măsurărilor se va dezvolta, se vor introduce noi corecții. Menținînd definiția metrului ca o parte din meridianul pămîntesc, a fost necesar, după fiecare nouă măsurare a meridianului, să se confecționeze noi etaloane și să se recalculeze toate lungimile. De aceea, după discuțiile din congresele internaționale din anii 1870, 1872 și 1875 s-a hotărît să se considere ca unitate de lungime nu a patruzecea milioana parte din meridian, ci metrul etalon confecționat în 1799 și care se păstrează azi la Biroul internațional de măsuri și greutăți din Paris.

Istoria metrului nu se sfîrșește aici. Noile idei fizice sînt puse în prezent la baza definiției acestei unități fundamentale. Unitatea de măsură a lungimilor este tot împrumutată din natură, dar într-un mod mult mai ingenios.

O dată cu metrul au apărut și submultiplii lui: a mia parte, numită milimetru, a milioana parte, numită micron, și cel mai întrebuințat, a suta parte, numit centimetru.

Acum vom spune cîteva cuvinte despre secundă. Ea este mult mai veche decît centimetrul. Cînd s-a stabilit unitatea de măsură a timpului, nu s-a produs nici o divergență de păreri. Acest lucru este ușor de înțeles, căci alternanța zilei cu noaptea, ciclul solar veșnic sugerează o metodă naturală de alegere a unității de timp. Cînd Soarele se găsește sus pe cer înseamnă că este amiază și, măsurînd

lungimea umbrei aruncate de un băț, se poate ușor stabili momentul cînd astrul zilei se află în punctul cel mai de sus. În ziua următoare, prin același mijloc se poate marca același moment. Intervalul de timp care s-a scurs între cele două observații formează o zi. Rămîne apoi să se împartă ziua în ore, minute și secunde.

Unitățile mari de măsură a timpului — anul și zilele — ne-au fost date de natură, dar ora, minutul și secunda au fost născocite de om.

Împărțirea actuală a zilelor își are originea în adînca antichitate. În Babilon nu se folosea sistemul zecimal, ci cel sexagesimal. Șaizeci se împarte exact la doisprezece, de unde babilonienii au adoptat împărțirea zilelor în douăsprezece părți egale.

În Egiptul vechi s-a introdus diviziunea zilei în 24 de ore. Ulterior au apărut minutele și secundele. Faptul că ora are 60 de minute, iar minutul are 60 de secunde este, de asemenea, o moștenire a sistemului sexagesimal al Babilonului.

În antichitate și în evul mediu, timpul se măsura cu ajutorul ceasornicelor solare, al ceasornicelor cu apă (după timpul de scurgere a apei din niște vase mari de piatră sau metal) și printr-o serie de dispozitive ingenioase, dar foarte neprecise.

Cu ajutorul ceasornicelor moderne ne putem convinge cu ușurință că zilele nu sînt de loc egale în diferitele momente ale anului. De aceea s-a convenit să se ia ca unitate de măsură a timpului ziua solară medie pe un an. A 24-a parte a acestui interval mediu de timp se numește oră.

Stabilind însă unitățile de timp — oră, minut, secundă —, prin împărțirea zilei în părți egale, presupunem că Pămîntul se învîrtește în mod uniform. Dar mareele oceanelor provocate de atracția Soarelui și a Lunii încetinesc rotația Pămîntului, fie chiar într-o măsură infimă. Vasăzică, unitatea de timp — ziua — se lungește neîncetat.

Această încetinire a rotației Pămîntului este atît de neînsemnată, încît a putut fi măsurată direct de-abia de curînd, cu o precizie colosală de o milionime de secundă. Variația zilei atinge 1—2 milisecunde la 100 de ani.

Etalonul însă, dacă-i posibil, trebuie să excludă chiar o eroare atît de neînsemnată. Conform ultimei determinări, secunda este a 1/31 556 925,9747 parte dintr-un anumit an, nu o parte din ziua solară medie.

Greutatea și masa

Greutatea reprezintă forța cu care un corp este atras de Pămînt. Această forță se poate măsura cu un cîntar cu resort. Cu cît corpul cîntărește mai mult, cu atît resortul de care este atîrnat se întinde mai mult. Cu ajutorul unor greutăți de metal luate ca unitate se

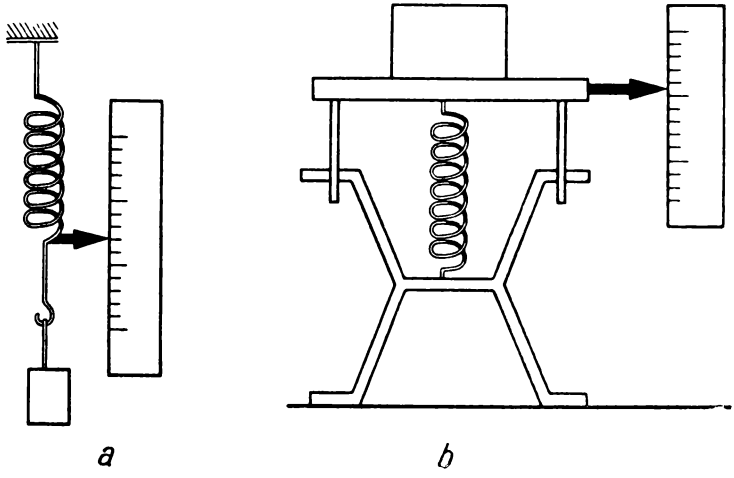


FIG. 1

poate grada resortul, adică se pot face niște semne care indică cu cît s-a întins resortul sub influența unor greutăți de un kilogram, două, trei și așa mai departe. Dacă, după aceea, se suspendă de un astfel de cîntar un corp, se va putea găsi, după întinderea resortului, forța exprimată în kilograme cu care Pămîntul atrage corpul respectiv (fig. 1, *a*). Pentru măsurarea greutății se folosește nu numai un resort care se întinde, ci și unul care se comprimă (fig.1,*b*). Utilizînd resoarte de diferite grosimi, se pot construi cîntare chiar pentru măsurarea greutăților mari și foarte mari. Pe acest principiu se bazează nu numai construcția cîntarelor mari comerciale, ci și a instrumentelor foarte fine, utilizate la măsurări în fizică.

Resortul gradat servește nu numai la măsurarea forței de atracție pămîntească, adică a greutății, ci și la măsurarea altor forțe. Un astfel de instrument se numește dinamometru, ceea ce înseamnă măsurător de forțe. Dinamometrul se folosește și la măsurarea forței musculare a omului. De asemenea și forța de tracțiune a unui motor se poate măsura cu ușurință cu ajutorul unui resort care se întinde (fig. 2).

Greutatea unui corp este o proprietate foarte importantă a sa. Dar greutatea nu depinde numai de corp. Acesta este atras de Pămînt. Dar dacă ne-am găsi pe Lună? Evident, atunci greutatea ar fi alta, și anume de șase ori mai mică decît arată calculele. Dar chiar și pe Pămînt, greutatea diferă cu latitudinea. La poli, de exemplu, un corp cîntărește cu 0,5% mai mult decît la ecuator.

Cu toată variabilitatea sa însă, greutatea are o particularitate remarcabilă: raportul dintre greutățile a două corpuri, după cum arată experiența, rămîne neschimbat în orice condiții. Dacă două corpuri diferite întind la pol resortul în mod identic, această identitate se menține cu precizie și la ecuator.

Cînd se măsoară o greutate prin comparație cu greutatea unui etalon, se găsește o nouă proprietate a corpurilor, așa-numita masă a lor.

Sensul fizic al acestei noi noțiuni — de masă — este strîns legat de identitatea din cazul comparării greutăților, pe care am remarcat-o mai înainte.

Spre deosebire de greutate, masa este o proprietate invariabilă a unui corp; ea nu depinde decît de corpul respectiv.

Compararea greutăților, adică măsurarea masei, se poate face în modul cel mai lesnicios cu ajutorul unei balanțe obișnuite, cu

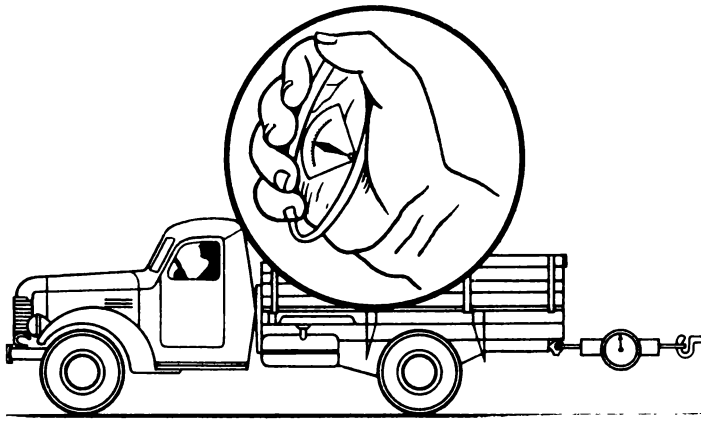


FIG. 2

pîrghii (fig. 3). Spunem că masele a două corpuri sînt egale, dacă balanța cu pîrghii pe talerele căreia sînt așezate aceste corpuri este în echilibru perfect. Dacă un corp greu este cîntărit cu o balanță cu pîrghii la ecuator și dacă, după aceea, se transportă corpul greu și greutatea de metal la pol, ambele își modifică ponderea în mod

identic. De aceea, cîntărirea la pol va da același rezultat: balanța va rămîne în echilibru.

Putem verifica acest principiu și în cazul Lunii. Întrucît și acolo raportul dintre greutățile corpurilor rămîne neschimbat, corpul greu pus pe balanța cu pîrghii va fi echilibrat de aceleași greutăți de metal. Masa corpului este una și aceeași oriunde s-ar găsi acesta.

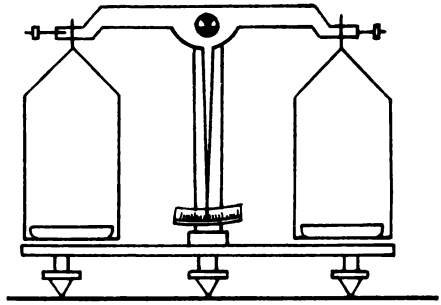


FIG. 3

Atît unitățile de masă, cît și cele de greutate sînt în legătură cu alegerea greutății etalon. Ca și în istoria metrului și a secundei, oamenii au încercat să găsească un etalon natural de masă. Aceeași comisie a confecționat dintr-un anumit aliaj o greutate care să echilibreze la o balanță cu pîrghii un decimetru cub de apă la temperatura de 4°C (patru grade Celsius)[1]. Acest etalon este tocmai kilogramul.

Ulterior însă s-a constatat că nu-i atît de simplu de „luat" un decimetru cub de apă. În primul rînd, decimetrul, ca submultiplu al metrului, variază o dată cu precizarea etalonului metrului. În al doilea rînd, ce fel trebuie să fie apa? Chimic pură? Dublu distilată? Fără urme de aer? Și ce este de făcut cu adaosul de „apă grea"? Și, pe deasupra, precizia măsurării volumului este sensibil mai mică decît precizia cîntăririi.

A trebuit și aici să se renunțe la unitatea naturală și să se ia ca unitate de măsură a masei, masa unei greutăți de metal confecționată în mod special. Această greutate se păstrează, tot la Paris, împreună cu metrul etalon.

Pentru măsurarea masei se folosesc pe scară largă a mia și a milioana parte dintr-un kilogram, adică gramul și miligramul. Greutatea etalonului la paralela 45 a Pămîntului se numește kilogram-forță și se notează cu kgf, iar masa acestei greutăți se numește

---

[1] Această temperatură n-a fost aleasă întîmplător. În adevăr, cînd apa se încălzește, volumul apei variază într-un mod foarte curios, nu ca la majoritatea corpurilor. De obicei, cînd un corp se încălzește, el se dilată, dar apa, cînd temperatura ei se ridică de la 0 la 4°C, se contractă și numai după ce trece de la 4°C începe să se dilate. Așadar, 4°C este temperatura la care apa încetează să se mai contracte și începe să se dilate.

kilogram și se notează cu kg. Pe Lună, masa acestui etalon va fi, ca și mai înainte, de 1 kg, dar greutatea lui devine de aproximativ 0,17 kgf. Așadar, forța (greutatea este o forță) și masa au unități de măsură care poartă denumiri apropiate. Această situație poate duce la confuzii serioase cînd este vorba de interpretarea „relațiilor reciproce" dintre greutate și masă. Pentru a clarifica aceste probleme, a X-a și a XI-a (1960) Conferință generală de măsuri și greutăți au elaborat, și apoi majoritatea țărilor au adoptat, un nou sistem internațional de unități (SI). În acest nou sistem, denumirea de kilogram (kg) a fost menținută pentru unitatea de masă. Orice forță (inclusiv, firește, greutatea) se măsoară, în noul sistem, în newtoni (N). De ce a fost denumită așa această unitate și care este definiția ei vom afla ceva mai tîrziu.

Desigur că noul sistem nu va fi aplicat imediat și pretutindeni și de aceea deocamdată e util să reținem că kilogramul (kg) și kilogramul-forță (kgf) sînt două unități distincte și trebuie să se facă cu ele operații aritmetice ca și cum ar fi niște numere purtînd denumiri diferite. A scrie 5 kg + 2 kgf = 7 este tot atît de lipsit de sens ca și cum s-ar aduna metri cu secunde.

Densitatea

Ce se înțelege cînd se spune: greu ca plumbul sau ușor ca puful? E clar că o alice de plumb va fi ușoară, pe cînd un munte de puf are o masă considerabilă. Cei ce se folosesc de astfel de comparații nu au în vedere masa corpurilor, ci densitatea substanței din care sînt făcute aceste corpuri.

Se numește densitate a unui corp masa unității de volum. Bineînțeles că densitatea plumbului este aceeași, atît într-o alice de plumb, cît și într-un bloc masiv.

Cînd se notează densitatea, de obicei se indică cîte grame (g) cîntărește un centimetru cub (cm^3) din corpul respectiv, iar după număr se scrie simbolul g/cm^3. Pentru determinarea densității, trebuie să se împartă numărul de grame la numărul de centimetri cubi; linia de fracție a simbolului are tocmai această semnificație.

Dintre materialele cele mai grele fac parte cîteva metale — osmiul — a cărui densitate este de 22,5 g/cm^3, iridiul (22,4 g/cm^3), platina (21,5 g/cm^3), wolframul și aurul (19,3 g/cm^3). Densitatea fierului este de 7,88 g/cm^3, iar densitatea cuprului este de 8,93 g/cm^3.

Cele mai ușoare metale sînt magneziul (1,74 g/cm³), beriliul (1,83 g/cm³) și aluminiul (2,70 g/cm³). Corpuri și mai ușoare se găsesc printre substanțele organice: diferitele sorturi de lemne și de mase plastice pot avea o densitate pînă la 0,4 g/cm³.

De notat că aici e vorba de corpuri masive. Dacă un corp solid are pori, se înțelege că va fi mai ușor. În tehnică, în multe cazuri se întrebuințează corpuri poroase: plută, sticlă spongioasă. Densitatea sticlei spongioase poate fi mai mică de 0,5 g/cm³, deși substanța solidă din care este făcută are o densitate mai mare decît unitatea. Ca toate corpurile care au densitate mai mică decît unitatea, sticla spongioasă plutește perfect pe apă.

Cel mai ușor lichid este hidrogenul lichid, care se poate obține numai la temperaturi foarte joase. Un centimetru cub de hidrogen lichid are o masă de 0,07 g. Lichidele organice — alcoolul, benzina, petrolul lampant — au o densitate care nu diferă prea mult de cea a apei. Foarte greu este mercurul, care are o densitate de 13,6 g/cm³.

Cum se poate însă caracteriza densitatea gazelor? După cum se știe, gazele ocupă tot volumul care le stă la dispoziție. Dacă vom lua mai multe vase, avînd volume diferite, și dacă în fiecare din ele vom introduce aceeași cantitate de gaz, aceste vase se vor umple în toate cazurile în mod uniform cu gaz. Atunci, cum se poate vorbi de densitate?

Densitatea gazelor se determină în așa-numitele condiții normale, adică la temperatura de 0°C și la presiunea de o atmosferă. Densitatea aerului în condiții normale este de 0,001 29 g/cm³, iar a clorului de 0,003 22 g/cm³. Hidrogenul gazos, ca și cel lichid, bate recordul: densitatea lui este de 0,000 09 g/cm³.

Următorul gaz ca greutate este heliul: de două ori mai greu decît hidrogenul. Bioxidul de carbon este de 1,5 ori mai greu decît aerul. În Italia, în apropiere de Napoli, există vestita Peșteră a Cîinelui; pe la partea inferioară a acestei peșteri se degajă neîncetat bioxid de carbon; acesta se lasă în jos și iese încet din peșteră. Omul poate intra fără pericol în această peșteră, dar pentru un cîine o astfel de plimbare se sfîrșește prost. De aici vine și numele peșterii.

Densitatea gazelor este foarte sensibilă la condițiile exterioare: presiune și temperatură. Dacă nu se indică condițiile exterioare, densitatea gazelor nu are nici un sens. Densitatea corpurilor lichide și solide depinde și ea de temperatură și de presiune, dar în măsură mult mai mică.

Legea conservării masei

Dacă se dizolvă zahăr în apă, masa soluției va fi riguros egală cu suma maselor zahărului și apei.

Această experiență și un număr nesfîrșit de altele asemănătoare arată că masa unui corp este o proprietate invariabilă. Oricum ar fi sfărîmat sau dizolvat un corp, masa lui rămîne neschimbată.

Același lucru se întîmplă și în cazul oricăror transformări chimice. Dacă s-a ars cărbune, prin cîntăriri precise se poate stabili că masa cărbunelui și a oxigenului din aer, consumat pentru ardere, este exact egală cu masa produselor arderii.

Legea conservării masei s-a verificat ultima dată la sfîrșitul secolului al XIX-lea, cînd tehnica cîntăririi precise ajunsese foarte avansată. S-a constatat că în orice transformări chimice, masa nu se schimbă nici cu a suta miliarda parte din valoarea ei.

Chiar oamenii din antichitate considerau că masa este invariabilă. Această lege a fost supusă pentru prima oară la o verificare experimentală în anul 1756. Cel care a făcut acest lucru a fost Mihail Vasilievici Lomonosov, care a demonstrat experimental, în anul 1756, conservarea masei în cazul arderii unui metal.

Masa este cea mai importantă caracteristică invariabilă a unui corp. Cea mai mare parte a însușirilor corpurilor se află, ca să spunem așa, în mîinile omului. Prin călire, fierul moale, se poate face dur și casant. Cu ajutorul ultrasunetelor, o soluție tulbure poate deveni transparentă. Proprietățile mecanice, electrice și termice se pot modifica datorită influențelor exterioare. Dacă nu se adaugă substanță la un corp și dacă nu se scoate din el nici o părticică, este însă imposibil să se modifice masa corpului[1], oricare ar fi influențele exterioare la care s-ar recurge.

Acțiunea și reacțiunea

Adesea nu dăm atenție faptului că orice acțiune a unei forțe este însoțită de o reacțiune. Dacă pe o somieră se pune un geamantan, somiera se deformează. Faptul că geamantanul acționează asupra somierei este evident pentru oricine. Uneori însă se uită că și asupra geamantanului acționează o forță din partea somierei. Într-adevăr, geamantanul pus pe somieră nu cade, ceea ce înseamnă

[1] Cititorul va afla mai departe despre unele limitări ale acestei afirmații.

MIHAIL VASILIEVICI LOMONOSOV (1711—1765) remarcabil om de știință rus, întemeietorul științei în Rusia, mare iluminist. În domeniul fizicii, Lomonosov a combătut cu hotărîre concepțiile răspîndite în secolul al XVIII-lea despre „lichidele" electrice și calorice, susținînd teoria moleculare-cinetică a materiei. Lomonosov a demonstrat experimental, pentru prima oară, legea constanței masei substanțelor care iau parte la transformările chimice. Lomonosov a făcut cercetări întinse în domeniul electricității atmosferice și al meteorologiei. El a construit o serie de instrumente optice remarcabile și a descoperit existența atmosferei pe Venus. Lomonosov a pus bazele limbii științifice ruseşti; el a reușit să traducă, în mod excepțional, din latinește principalii termeni de fizică și chimie.

că asupra lui acționează o forță egală cu greutatea geamantanului și dirijată de jos în sus.

Forțele dirijate în sens contrar forței greutății se numesc adesea forțe de reacțiune (sau reacțiuni) în reazem. Cuvîntul „reacțiune" înseamnă „contraacțiune". Acțiunea mesei asupra unei cărți așezate pe ea, acțiunea somierei asupra geamantanului pus pe ea constituie reacțiuni în reazem.

După cum am mai spus, greutatea unui corp se determină cu ajutorul cîntarului cu resort. Acțiunea corpului asupra resortului pus sub el sau forța care întinde resortul de care este suspendat corpul, sînt egale cu greutatea corpului. Evident însă că întinderea sau comprimarea resortului arată în aceeași măsură și mărimea reacțiunii în reazem.

Vasăzică, cînd măsurăm o forță oarecare, cu ajutorul unui resort, nu măsurăm o singură forță, ci două forțe dirijate în sensuri opuse. Cîntarul cu resort măsoară atît presiunea corpului greu asupra talerului cîntarului, cît și reacțiunea în reazem, adică acțiunea talerului cîntarului asupra corpului greu. Dacă fixăm resortul în perete și îl întindem cu mîna, putem măsura forța cu care mîna trage resortul și în același timp și forța cu care resortul trage mîna.

Așadar, forțele au o însușire remarcabilă: ele se găsesc întotdeauna cîte două, egale între ele și de sens contrar. Aceste două forțe se numesc, de obicei, acțiune și reacțiune.

În natură nu se întîlnesc forțe „izolate", ci există, de fapt, numai interacțiuni între corpuri; totodată forțele de acțiune și reacțiune sînt invariabil egale, între ele existînd aceleași raporturi ca între un obiect și imaginea lui într-o oglindă.

Nu trebuie să se confunde forțele care se echilibrează cu forțele de acțiune și reacțiune.

Despre forțe se spune că se echilibrează atunci cînd sînt aplicate la același corp: astfel, de exemplu, greutatea unei cărți așezate pe o masă (acțiunea Pămîntului asupra cărții) este echilibrată de reacțiunea mesei (acțiunea mesei asupra cărții).

Contrar forțelor care iau naștere cînd se echilibrează două interacțiuni, forțele de acțiune și reacțiune caracterizează o singură interacțiune, de pildă aceea a mesei cu cartea. Acțiunea este de la masă la carte, iar reacțiunea este de la carte la masă. Firește, aceste forțe sînt aplicate la corpuri diferite.

Să încercăm acum să lămurim o nedumerire tradițională: „calul trage căruța, dar și căruța trage de cal; de ce însă amîndoi se mișcă?" În primul rînd trebuie să nu se uite că, calul nu poate trage căruța dacă drumul e alunecos. Deci, pentru a explica

mișcarea, trebuie să se țină seama nu de o interacțiune, ci de două, adică nu numai de interacțiunea dintre căruță și cal, ci și de aceea dintre cal și drum. Mișcarea va începe atunci cînd forța de interacțiune dintre cal și drum (forța cu care calul este respins de drum) devine mai mare decît forța de interacțiune dintre cal și căruță (forța cu care căruța trage calul). În ce privește forțele „căruța trage calul" și „calul trage căruța", ele caracterizează una și aceeași interacțiune și, prin urmare, vor fi identice atît în stare de repaus, cît și în orice moment al mișcării.

Cum se adună vitezele

Dacă am așteptat o jumătate de oră și încă o oră, am pierdut în total un timp de o oră și jumătate. Dacă cineva ne-a dat un leu și apoi încă doi, am căpătat în total trei lei. Dacă am cumpărat 200 g de struguri și după aceea încă 400 g, vom avea 600 g struguri. Despre timp, masă și alte asemenea mărimi se spune că se adună algebric.

Dar nu toate mărimile se pot aduna și scădea așa de simplu. Dacă spunem că de la Moscova la Kolomna sînt 100 km, iar de la Kolomna la Kașira sînt 40 km, de aici nu rezultă că Kașira se găsește la o distanță de 140 km de Moscova. Distanțele nu se adună algebric.

Cum se mai pot aduna mărimile? Cu ajutorul exemplului nostru vom putea găsi regula cu ușurință. Să însemnăm cu trei puncte (fig. 4) poziția reciprocă a celor trei localități menționate. Cu aceste trei puncte se poate construi un triunghi. Dacă sînt cunoscute două laturi ale lui, se poate găsi cea de-a treia. În acest scop, însă, trebuie să se cunoască și unghiul dintre cele două segmente date.

Distanța necunoscută se află în modul următor: luăm pe hîrtie primul segment și, din extremitatea lui, construim, pe direcția dată, al doilea segment. Apoi unim începutul primului segment cu sfîrșitul celui de-al doilea. Distanța căutată este reprezentată de segmentul care închide triunghiul.

Adunarea prin această metodă se numește geometrică, iar mărimile care se adună în acest fel se numesc vectori.

Pentru a se putea deosebi începutul și sfîrșitul unui segment, se pune la un capăt al lui o săgeată. Un astfel de segment — numit vector — indică lungimea și sensul.

Această regulă se aplică și în cazul adunării mai multor vectori. Trecînd de la primul punct la al doilea, de la al doilea la al treilea și așa mai departe, parcurgem un drum care se poate reprezenta printr-o linie frîntă. Dar la același punct final se poate ajunge și

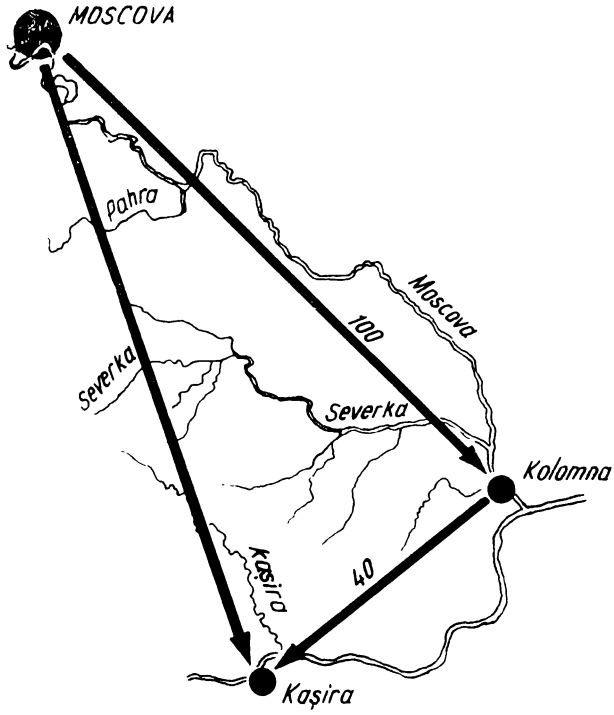


FIG. 4

direct de la punctul inițial. Acest segment care închide poligonul format va fi tocmai suma vectorilor.

Triunghiul de vectori arată, bineînțeles, și cum se poate scădea un vector din altul. În acest scop, se duc ambii vectori din același punct. Vectorul dus de la capătul celui de-al doilea la capătul celui dintîi va reprezenta tocmai diferența vectorilor.

În afară de regula triunghiului se poate aplica și regula echivalentă a paralelogramului (fig. 5). Această regulă necesită construirea unui paralelogram avînd ca laturi vectorii care urmează a se aduna și ducerea diagonalei din punctul lor de intersecție. Din figură se vede că diagonala paralelogramului este tocmai linia de

închidere a triunghiului. Prin urmare, ambele reguli sînt la fel de bune.

Vectorii se folosesc nu numai pentru descrierea deplasărilor. În fizică se întîlnesc foarte des mărimi vectoriale.

Să considerăm, de exemplu, viteza. Viteza este deplasarea în unitatea de timp. Întrucît deplasarea este un vector, înseamnă că și viteza este tot un vector dirijat în același sens. În cazul deplasării pe o linie curbă, direcția deplasării variază tot timpul. Însă cum se poate răspunde la întrebarea: care este direcția vitezei? Un segment mic de curbă are aceeași direcție ca și tangenta la el. De aceea, deplasarea și viteza unui corp sînt dirijate în fiecare moment după tangenta la traiectorie.

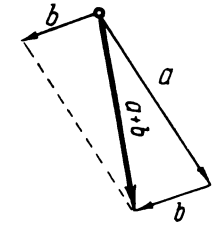


FIG. 5

În multe cazuri este nevoie să se adune sau să se scadă viteze după regula vectorilor. Adunarea vitezelor este necesară cînd un corp efectuează în același timp două mișcări. Astfel de cazuri nu sînt de loc rare: un om merge cu trenul și, în afară de aceasta, se deplasează în tren; o picătură de apă care se scurge pe geamul vagonului se deplasează în jos sub efectul greutății și în același timp călătorește împreună cu trenul; globul pămîntesc se mișcă în jurul Soarelui și împreună cu Soarele efectuează o mișcare în raport cu alte stele. În toate aceste cazuri și în alte asemenea, vitezele se adună după regula adunării vectorilor.

Dacă ambele mișcări se efectuează de-a lungul aceleiași linii, adunarea vectorială se transformă într-o adunare obișnuită, dacă ambele mișcări au același sens, și într-o scădere obișnuită, dacă mișcările au sensuri contrare.

Dar dacă direcțiile mișcărilor formează între ele un unghi oarecare? Atunci recurgem la adunarea geometrică. Dacă o barcă traversează un rîu repede și cîrma este ținută transversal pe curent, atunci ea va devia în josul apei. Barca va efectua două mișcări: de-a curmezișul rîului și în lungul acestuia. Viteza rezultantă a bărcii este arătată în fig. 6.

Încă un exemplu. Cum se vede mișcarea unei șuvițe de apă de ploaie privită de la fereastra unui vagon de cale ferată în mers? Desigur că ați observat ploaia de la fereastra vagonului. Chiar cînd nu bate vîntul, ea are direcție înclinată, ca și cum ar fi abătută de un vînt care suflă din fața locomotivei (fig. 7).

Dacă nu bate vîntul, picătura de ploaie cade vertical, dar în timpul căderii picăturii de-a lungul ferestrei, trenul parcurge

un drum considerabil, depărtîndu-se de la verticala căderii și de aceea ploaia pare oblică.

Dacă viteza trenului este v_t, iar viteza cu care cade picătura este v_p, viteza de cădere a picăturii în raport cu un călător din tren se obține prin scăderea vectorială a lui v_t din v_p*. Triunghiul

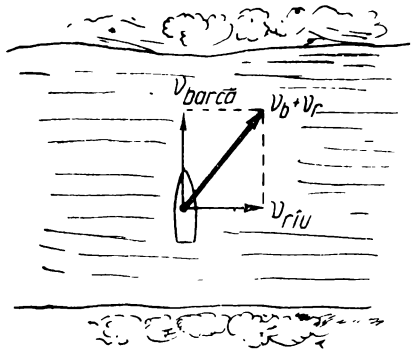


FIG. 6

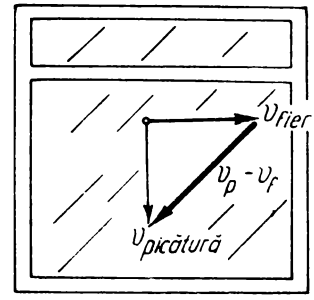


FIG. 7

vitezelor este reprezentat în fig. 7. Direcția vectorului oblic indică direcția ploii; acum este clar de ce vedem ploaia oblică. Imaginea săgeții oblice dă, la scara aleasă, mărimea acestei viteze. Cu cît trenul merge mai repede și cu cît picătura cade mai încet, cu atît șiroaiele de ploaie ni se par înclinate.

Forța este un vector

Forța, ca și viteza, este o mărime vectorială, căci acționează întotdeauna într-un anumit sens. Așadar, și forțele trebuie să se adune după regulile pe care le-am analizat mai înainte.

Adesea întîlnim în viață exemple care ilustrează adunarea vectorială a forțelor. În fig. 8 este arătată o funie de care atîrnă un balot. Un om trage balotul cu o frînghie în lături. Funia este întinsă de efectul a două forțe: greutatea balotului și forța omului.

Regula adunării vectoriale a forțelor permite să se determine direcția funiei și să se calculeze forța cu care este întinsă. Balotul se găsește în stare de repaus; așadar, suma forțelor care acționează asupra lui trebuie să fie egală cu zero. Dar se poate spune și astfel:

* Aici și în cele ce urmează vectorii îi vom nota cu litere mai groase.

tensiunea funiei trebuie să fie echilibrată de forța rezultantă a sumei dintre greutatea balotului și forța de tracțiune laterală exercitată cu ajutorul frînghiei. Suma acestor forțe este dată de diagonala paralelogramului marcată printr-o săgeată; ea va fi dirijată în prelungirea funiei (căci în caz contrar, ea nu poate fi „anihilată" de tensiunea funiei). Lungimea săgeții va reprezenta tensiunea funiei. Această forță ar putea înlocui cele două forțe care acționează asupra balotului. De aceea, suma vectorială a forțelor se numește uneori rezultanta lor.

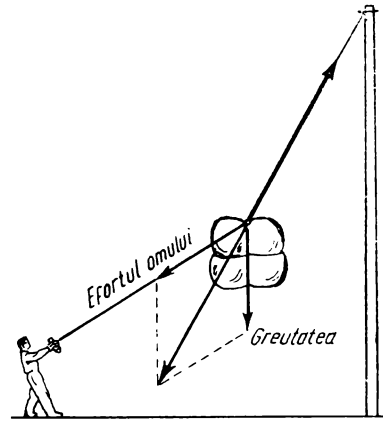


FIG. 8

De foarte multe ori se pune problema inversă adunării sau compunerii forțelor. O lampă este suspendată cu două cabluri. Pentru a determina tensiunile în cabluri, trebuie să se descompună greutatea lămpii după aceste două direcții.

Din extremitatea vectorului rezultant (fig. 9) ducem linii paralele cu cablurile pînă ce se intersectează cu acestea. Se obține, astfel, paralelogramul forțelor. Măsurînd lungimea laturilor paralelogramului, vom găsi (la aceeași scară la care este reprezentată greutatea lămpii) valorile tensiunilor în cabluri.

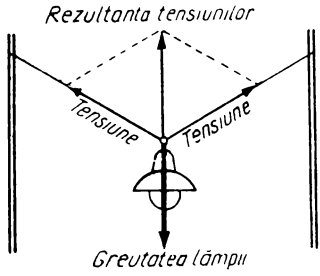


FIG. 9

Această construcție se numește descompunerea forței. Orice număr se poate reprezenta într-o mulțime infinită de moduri sub forma sumei a două sau mai multe numere; același lucrù se poate face și cu vectorul unei forțe: orice forță se poate descompune în două componente — formînd laturile unui paralelogram — dintre care una poate fi întotdeauna aleasă arbitrar. De asemenea, este clar că pe fiecare vector se poate construi orice poligon dorim.

Adesea este comod să se descompună o forță în două forțe perpendiculare una pe alta — una pe direcția care ne interesează și alta

perpendiculară pe această direcție. Ele se numesc componenta longitudinală și componenta normală (perpendiculară) ale forței.

Componenta unei forțe pe o direcție oarecare, construită prin descompunerea după laturile unui dreptunghi, se mai numește și proiecția forței pe acea direcție.

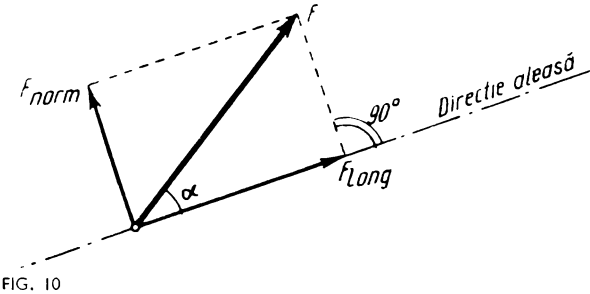


FIG. 10

Din fig. 10 rezultă că

$$F^2 = F^2_{long} + F^2_{norm},$$

în care F_{long} și F_{norm} sînt proiecțiile forței pe direcția aleasă și pe normala la ea.

Cei ce cunosc trigonometria vor stabili, fără nici o dificultate, că

$$F_{long} = F \cdot \cos\alpha,$$

în care α este unghiul dintre vectorul forței și direcția pe care el se proiectează.

Un exemplu foarte interesant de descompunere a forțelor îl oferă deplasarea unei bărci cu pînze. Cum se poate naviga cu pînze în contra vîntului? Dacă ați avut ocazia să observați un iaht cu pînze în această situație, ați putut vedea că el înaintează în zigzag. Marinarii numesc această deplasare navigație în volte.

Firește că este imposibil a înainta cu pînzele direct împotriva vîntului, dar de ce se poate merge contra vîntului sub un unghi oarecare?

Posibilitatea de a merge în volte împotriva vîntului se bazează pe două împrejurări. În primul rînd, vîntul lovește în pînză întotdeauna sub un unghi drept față de planul ei. Priviți fig. 11, *a*: forța vîntului este descompusă în două componente: una dintre ele silește aerul să alunece de-a lungul pînzei, iar cealaltă — componenta normală — exercită o presiune asupra pînzei. În al doilea rînd, barca nu se deplasează încotro o împinge forța vîntului, ci încotro este îndreptată prora bărcii.

Aceasta se explică prin faptul că deplasarea bărcii transversal pe linia chilei întîmpină o rezistență foarte mare din partea apei. Prin urmare, pentru ca barca să se deplaseze cu prora înainte trebuie ca forța de presiune asupra pînzei să aibă o componentă de-a lungul liniei chilei, dirijată înainte.

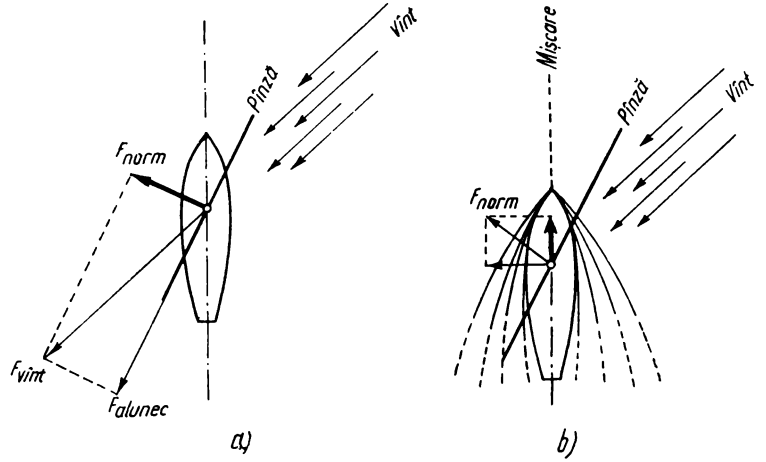


FIG. 11

Acum, fig. 11, *b*, în care este reprezentată o barcă înaintînd împotriva vîntului, devine inteligibilă. Se așază pînza în așa fel, încît planul ei să împartă în două părți egale unghiul dintre direcția de mers a bărcii și direcția vîntului.

Pentru a găsi forța care împinge barca înainte, trebuie să se descompună forța vîntului de două ori. Mai întîi se descompune după direcția pînzei și după direcția perpendiculară pe ea — aici are importanță numai componenta normală — și apoi trebuie să se descompună componenta normală după linia chilei și după direcția transversală pe linia chilei. Componenta longitudinală este aceea care împinge barca pe direcția aleasă care formează un unghi oarecare cu direcția vîntului.

Planul înclinat

O rampă foarte înclinată este mai greu de urcat decît una puțin înclinată. Este mai ușor de rostogolit un corp în sus pe un plan înclinat decît a-l ridica pe verticală. De ce și cu cît mai ușor?

Legea compunerii forțelor permite rezolvarea acestei probleme. În fig. 12 este arătat un cărucior cu roți, menținut pe un plan înclinat cu ajutorul unei frînghii întinse. Pe lîngă tracțiunea acesteia, asupra căruciorului acționează încă două forțe: greutatea și forța de reacțiune în reazem, care acționează întotdeauna după normala la suprafață, indiferent dacă suprafața reazemului este orizontală sau înclinată.

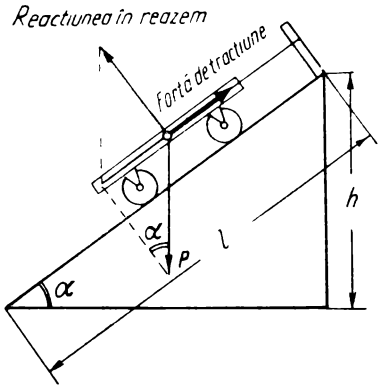


FIG. 12

După cum s-a mai spus, dacă un corp apasă asupra reazemului, acesta reacționează la presiune sau, cum se spune, dă naștere la o forță de reacțiune.

Pe noi ne interesează în ce măsură este mai ușor a trage căruciorul în sus pe planul înclinat, decît a-l ridica vertical.

Vom descompune forțele în așa fel, încît o componentă să fie dirijată de-a lungul suprafeței pe care se deplasează corpul, iar cealaltă perpendicular pe ea. Pentru ca corpul să fie în stare de repaus pe planul înclinat, trebuie ca tensiunea în frînghie să fie echilibrată numai de componenta longitudinală. În ce privește a doua componentă, ea este echilibrată de reacția în reazem.

Tensiunea T a frînghiei se poate găsi fie printr-o construcție geometrică, fie cu ajutorul trigonometriei. Construcția geometrică constă din a duce din capătul vectorului P al greutății o perpendiculară pe planul înclinat.

În figură se pot vedea triunghiuri asemenea. Raportul dintre lungimea l a planului înclinat și înălțimea h a lui este egal cu raportul dintre laturile corespunzătoare ale triunghiului forțelor. Așadar

$$\frac{T}{P} = \frac{h}{l}.$$

Cu cît planul înclinat are o pantă mai mică $\left(\frac{h}{l} \text{ mic}\right)$, cu atît este mai ușor de ridicat corpul pe el.

Acum, pentru cine cunoaște trigonometrie: întrucît unghiul dintre componenta normală pe plan a greutății și vectorul greutății

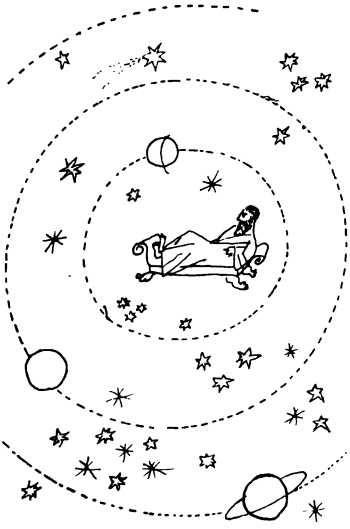
este egal cu unghiul α al planului înclinat (ele sînt unghiuri cu laturile perpendiculare unele pe altele), avem

$$\frac{T}{P} = \sin \alpha \qquad \text{și} \qquad T = P \sin \alpha.$$

Prin urmare, este de sin α ori mai ușor de tras căruciorul pe un plan înclinat cu unghiul α decît de ridicat pe verticală.

Este bine să se memoreze valorile funcțiilor trigonometrice pentru unghiurile de 30°, 45° și 60°. Cunoscînd aceste valori pentru sinus $\left(\sin 30° = \frac{1}{2},\ \sin 45° = \frac{\sqrt{2}}{2};\ \sin 60° = \frac{\sqrt{3}}{2}\right)$, ne vom putea face o idee corectă despre cîștigul de forță realizat în cazul mișcării pe un plan înclinat.

Din formulele de mai înainte se vedea că dacă unghiul planului înclinat este de 30°, efortul va fi egal cu jumătate din greutate: $T = P \cdot \frac{1}{2}$. La unghiuri de 45° și 60°, efortul va fi egal aproximativ cu 0,7 și, respectiv 0,9 din greutatea căruciorului. După cum vedem, astfel de plane înclinate cu pantă mare ușurează puțin munca.



II

Legile mişcării

Diferite puncte de vedere despre mişcare

Un geamantan stă pe plasa unui compartiment dintr-un vagon. În acelaşi timp, el se deplasează împreună cu trenul. O casă stă pe Pămînt, dar se şi mişcă împreună cu el. Despre unul şi acelaşi corp se poate spune că se mişcă în linie dreaptă, că este în repaus sau că se roteşte. Toate aceste aprecieri sînt juste, dar din diferite puncte de vedere.

Nu numai modul cum se prezintă mişcarea, ci şi proprietăţile mişcării sînt cu totul diferite dacă sînt considerate din diferite puncte de vedere.

Amintiţi-vă ce se întîmplă cu obiectele de pe un vapor clătinat de valuri. Ce neascultătoare sînt! Scrumiera pusă pe masă s-a răsturnat şi s-a refugiat în grabă sub pat. Apa din carafă plescăie, iar lampa oscilează ca un pendul. Unele obiecte se pun în mişcare, iar altele se opresc fără nici o cauză vizibilă. Legea fundamentală a mişcării, ar putea spune un observator de pe un astfel de vapor, constă în faptul că un obiect nefixat poate în orice moment să pornească în călătorie în orice direcţie şi cu cele mai diferite viteze.

Acest exemplu arată că printre diferitele puncte de vedere asupra mişcării sînt şi unele vădit incomode.

Care este, însă punctul de vedere cel mai „raţional"?

Dacă lampa de pe masă s-ar înclina sau tamponul ar începe să sară în sus din senin, aţi crede la început că vi s-a năzărit. Dacă

aceste minuni s-ar repeta, ați începe să căutați cauza care scoate aceste obiecte din starea de repaus.

De aceea este absolut natural să se considere rațional acel punct de vedere asupra mișcării, conform căruia corpurile în stare de repaus nu se mișcă din loc fără intervenția unei forțe.

Acest punct de vedere pare foarte rațional: dacă un corp este în repaus înseamnă că suma forțelor care acționează asupra lui este egală cu zero. Dacă corpul s-a mișcat din loc, el a făcut-o sub influența unei forțe.

Un punct de vedere presupune că există un observator. Pe noi însă nu ne interesează observatorul însuși, ci locul unde se găsește. De aceea, în loc de „punctul de vedere asupra mișcării", vom spune: „sistemul de referință în care se consideră mișcarea" sau mai simplu „sistemul de referință".

Pentru noi, locuitorii Pământului, un sistem important de referință este Pământul. Adesea însă poate servi ca sistem de referință și un obiect care se deplasează pe Pământ, să zicem un vapor sau un tren.

Să ne întoarcem acum la „punctul de vedere" asupra mișcării pe care l-am numit rațional. Acest sistem de referință are un nume: el se numește „inerțial".

Vom vedea ceva mai jos de unde vine acest termen.

Proprietățile sistemului inerțial de referință sînt, prin urmare, următoarele: un corp care se găsește în stare de repaus în raport cu acest sistem nu suferă acțiunea nici unei forțe. Așadar, în acest sistem, nici o mișcare nu începe fără să intervină o forță. Simplitatea și comoditatea acestui sistem de referință sînt evidente. Rezultă că el merită să fie luat ca bază.

Extrem de important este și faptul că un sistem de referință legat de Pământ nu diferă prea mult de un sistem inerțial. De aceea putem începe studiul legilor fundamentale ale mișcării, considerîndu-se un sistem de referință legat de Pământ. Nu trebuie însă să se uite că, riguros vorbind, tot ce se va spune în paragraful următor se referă la un sistem inerțial de referință.

Principiul inerției

Sistemul inerțial de referință este comod și are avantaje neprețuite.

Acest sistem este însă unic sau, poate, există mai multe sisteme inerțiale? Grecii antici, de pildă, susțineau primul punct de vedere.

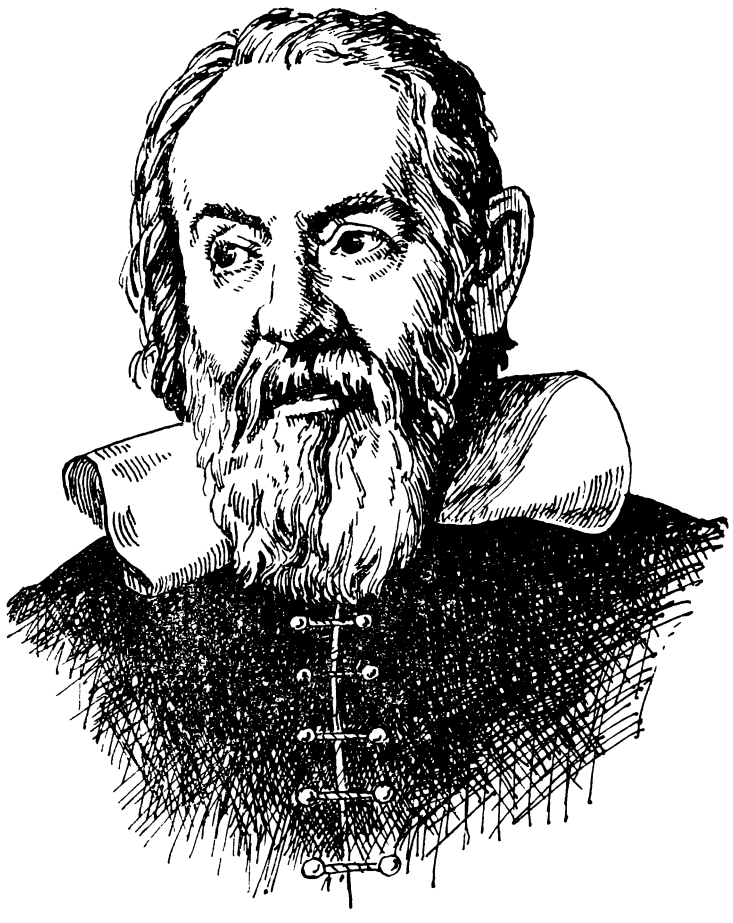
În lucrările lor găsim numeroase raționamente naive despre cauzele mișcării. Aceste concepții au fost desăvîrșite de Aristotel. După părerea acestui filozof, starea naturală a corpurilor este repausul, firește, în raport cu Pămîntul. Orice deplasare a unui corp, în raport cu Pămîntul, trebuie însă să aibă o cauză: forța. Dacă dispare cauza mișcării, corpul trebuie să se oprească, să revină la starea sa naturală. Această stare este repausul în raport cu Pămîntul. Din acest punct de vedere, Pămîntul este singurul sistem inerțial.

Descoperirea adevărului și respingerea acestei păreri greșite, dar foarte apropiate de psihologia naivă, le datorăm marelui geniu italian Galileo Galilei (1564—1642).

Să reflectăm asupra explicației date de Aristotel asupra mișcării și să căutăm în fenomenele pe care le cunoaștem confirmarea sau infirmarea ideii stării naturale de repaus a corpurilor care se găsesc pe Pămînt.

Să ne închipuim că ne găsim într-un avion care a plecat de pe un aeroport în zorii zilei. Soarele nu a încălzit încă aerul, nu există, deci „goluri de aer" care fac neplăceri multor călători. Avionul înaintează lin, pe nesimțite. Dacă nu te uiți pe fereastră, nici nu observi că zbori. Pe un fotoliu liber se găsește o carte, iar pe măsuță stă un măr. Toate obiectele din interiorul avionului sînt în nemișcare. Așa trebuie să fie, dacă Aristotel ar avea dreptate? Desigur că nu. După Aristotel, starea naturală a unui corp este repausul pe Pămînt. De ce atunci nu s-au adunat toate obiectele lîngă peretele posterior al avionului, căutînd să se sustragă mișcării lui, „dorind să treacă în starea de repaus" real? Ce silește mărul care stă pe masă și care are un contact așa de slab cu suprafața mesei să se miște cu viteza enormă de cîteva sute de kilometri pe oră?

Care este soluția justă pentru problema cauzei mișcării? Să vedem mai întîi de ce corpurile în mișcare se opresc. De exemplu, de ce se oprește o bilă care se rostogolește pe suprafața Pămîntului. Pentru a da un răspuns corect, trebuie să ne gîndim în care cazuri bila se oprește repede și în care se oprește încet. În acest scop nu este nevoie de experiențe speciale. Din practica de toate zilele, se știe prea bine că cu cît suprafața pe care se mișcă bila este mai netedă, cu atît ea se rostogolește mai departe. Din aceste experiențe și din altele asemănătoare se naște ideea naturală a forței de frecare, ca obstacol care se opune mișcării, ca o cauză a frînării unui obiect care se rostogolește sau alunecă pe suprafața Pămîntului. Frecarea se poate micșora prin diferite mijloace. Netezimea drumului, ungerea bună, lagărele perfecte permit ca un corp în mișcare să parcurgă liber, fără intervenția vreunei forțe, un drum cu atît mai mare, cu cît



GALILEO GALILEI (1564—1642), mare fizician și astronom italian, care a aplicat pentru prima oară metoda experimentală de cercetare în știință. Galilei a introdus noțiunea de inerție, a stabilit relativitatea mișcării, a studiat legile căderii corpurilor și ale mișcării corpurilor pe un plan înclinat, legile mișcării pe o traiectorie înclinată față de orizont și a folosit pendulul pentru măsurarea timpului. Primul în istoria omenirii, a cercetat cerul cu un telescop, a descoperit o mulțime de stele noi, a dovedit că Calea Lactee este formată dintr-un număr enorm de stele, a descoperit sateliții lui Jupiter, petele solare, rotația Soarelui și a studiat structura suprafeței Lunii. Galilei a susținut, în mod activ, sistemul heliocentric al lui Copernic, interzis pe vremea aceea de biserica catolică. Prigoana din partea inchiziției a întunecat ultimii ani ai vieții marelui savant.

ne vom strădui mai mult să facem să dispară orice rezistență care se opune mișcării.

Se pune întrebarea: ce s-ar întîmpla dacă n-ar exista această rezistență, dacă ar lipsi forțele de frecare? Evident, în acest caz, mișcarea ar continua la infinit cu aceeași viteză și pe aceeași traiectorie dreaptă.

Am formulat principiul inerției aproximativ în aceeași formă pe care i-a dat-o prima oară Galileo: inerția este denumirea prescurtată a aptitudinii unui corp de a se mișca rectiliniu și uniform... fără nici o cauză, în ciuda lui Aristotel. Inerția este o însușire inalienabilă a fiecărei particule din univers.

În acest mod se poate însă verifica justețea acestei legi remarcabile? Este imposibil să se creeze condiții în care asupra unui corp în mișcare să nu acționeze nici o forță. Acest lucru este adevărat, dar în schimb se poate observa și contrariul. În orice caz, cînd un corp își schimbă viteza sau direcția mișcării, se poate găsi întotdeauna cauza — forța căreia i se datorește această schimbare. Un corp capătă o anumită viteză cînd cade pe Pămînt; cauza este forța de atracție a Pămîntului. O piatră legată de o sfoară se rotește descriind un cerc: cauza care face ca piatra să devieze de la traiectoria rectilinie este tensiunea sforii. Dacă se rupe sfoara, piatra se îndepărtează în direcția în care se mișcă în momentul ruperii sforii. Mișcarea unui automobil care avansează cu motorul debreiat se încetinește; cauza este rezistența aerului, frecarea cauciucurilor pe șosea și imperfecțiunea rulmenților.

Principiul inerției este temelia pe care se reazemă toată teoria mișcării corpurilor.

Mișcarea relativă

Principiul inerției ne conduce la concluzia pluralității sistemelor inerțiale.

Nu unul, ci o mulțime de sisteme de referință exclud mișcările „fără cauză".

Dacă s-a găsit un astfel de sistem, se va găsi imediat și altul, care are mișcarea de translație (fără rotație) uniformă și liniară în raport cu primul. Totodată, un sistem inerțial nu e deloc mai bun decît celelalte și nu se deosebește prin nimic de celelalte. Nu se poate găsi cu nici un chip printre mulțimea de sisteme inerțiale unul care să fie cel mai bun. Legile mișcării corpurilor sînt identice în toate sistemele inerțiale: corpurile se pun în mișcare sub influența

forțelor, sînt frînate de forțe, iar cînd nu acționează asupra lor nici o forță, ele fie se găsesc în repaus, fie se mișcă uniform și rectiliniu.

Imposibilitatea de a scoate în evidență prin vreo experiență un sistem inerțial oarecare, în raport cu celelalte, formează esența așa-numitului principiu al relativității al lui Galilei — una dintre legile cele mai importante ale fizicii.

Deși punctele de vedere ale unor observatori care studiază fenomenele în două sisteme inerțiale sînt absolut egal justificate, aprecierile lor asupra unuia și aceluiași fapt sînt diferite. Să zicem că unul din observatori spune că scaunul pe care șade într-un tren în mișcare se găsește tot timpul în același punct al spațiului, iar celălalt observator, care se află pe peron, afirmă că acest scaun se deplasează dintr-un punct în altul. Sau să zicem că un observator, trăgînd cu pușca, spune că glonțul a pornit cu viteza de 500 m/s, iar celălalt observator, dacă se găsește într-un sistem care se deplasează în același sens cu o viteză de 200 m/s, spune că glonțul merge mult mai încet — cu viteza de 300 m/s.

Care din doi are dreptate? Amîndoi, căci principiul relativității mișcării nu permite să se dea preferință unui anumit sistem inerțial.

Rezultă că despre un punct al spațiului și despre o viteză de deplasare nu se pot emite judecăți necondiționate juste sau, cum se spune, absolute. Noțiunile de punct al spațiului și de viteză de deplasare sînt relative. Cînd se vorbește despre astfel de noțiuni relative, este necesar să se indice ce sistem inerțial de referință a fost considerat.

Așadar, lipsa unui punct de vedere „just", unic, asupra mișcării conduce la recunoașterea relativității spațiului. Spațiul s-ar putea numi absolut numai în cazul în care s-ar putea găsi în el un corp în repaus din punctul de vedere al tuturor observatorilor. Dar tocmai acest lucru este imposibil.

Relativitatea spațiului înseamnă că spațiul nu se poate concepe ca ceva presărat cu corpuri.

Relativitatea spațiului n-a fost recunoscută dintr-o dată de știință. Chiar un savant genial ca Newton considera spațiul ca absolut, deși își dădea seama că nu se poate stabili în nici un chip acest lucru. Acest punct de vedere eronat era răspîndit în rîndurile fizicienilor, pînă la sfîrșitul secolului al XIX-lea. Cauzele sînt, după cît se pare, de natură psihologică: sîntem prea obișnuiți să vedem în jurul nostru „aceleași puncte neclintite ale spațiului".

Acum trebuie să analizăm ce judecăți absolute se pot emite despre natura mișcării.

Dacă niște corpuri se mișcă în raport cu un singur sistem de referință cu vitezele v_1 și v_2, diferența $v_1 - v_2$ a lor (bineînțeles vectorială) va fi aceeași pentru orice observator inerțial, deoarece ambele viteze v_1 și v_2, cînd se schimbă sistemul de referință, variază cu aceeași cantitate.

Așadar, diferența vectorială a vitezelor a două corpuri este absolută. Dacă este așa, atunci și vectorul creșterii vitezei aceluiași corp într-un anumit interval de timp este absolut, adică mărimea lui este identică pentru toți observatorii inerțiali.

Ca și variația vitezei, rotația unui corp are un caracter absolut. Sensul rotației și turația pe minut vor fi identice din punctul de vedere al tuturor sistemelor inerțiale.

Punctul de vedere al unui observator sideral

Ne-am propus să studiem mișcarea din punctul de vedere al sistemelor inerțiale. În acest caz, nu trebuie, oare, să renunțăm la serviciile observatorului terestru? Se știe că Pămîntul se rotește în jurul axei sale și în jurul Soarelui (descoperirea lui Copernic). Astăzi, poate că cititorul își va da seama cu greu de caracterul revoluționar al descoperirii lui Copernic și-și va închipui cu greu că, apărînd justețea ideilor sale, Giordano Bruno a fost ars pe rug, iar Galilei a suferit umilințe și surghiun.

Care este însă meritul geniului lui Copernic? De ce descoperirea rotației Pămîntului poate fi pusă pe același picior cu ideile de dreptate omenească, pentru care oamenii progresiști au fost în stare să-și dea viața?

În cartea sa *Convorbire despre cele două sisteme principale ale lumii, a lui Ptolemeu și a lui Copernic*", pentru scrierea căreia Galilei a fost prigonit de biserică, el a dat adversarului sistemului lui Copernic numele de *simplicio*, ceea ce înseamnă „prostănac".

Într-adevăr, din punctul de vedere al percepției directe, simple a lumii, din punct de vedere a ceea ce se numește în mod nu prea fericit „bunul simț", sistemul lui Copernic pare bizar. Cum este posibil ca Pămîntul să se rotească? Nouă ni se pare că stă pe loc și că, în realitate, Soarele și stelele se mișcă.

Atitudinea teologilor față de descoperirea lui Copernic se vede din următoarea concluzie a unei adunări a teologilor (din anul 1616):

„Învățătura că Soarele se găsește în centrul lumii și este fix e mincinoasă și absurdă, formal eretică și contrară Sfintei Scripturi, iar învățătura că Pămîntul nu se găsește în centrul lumii și că se

mișcă, și în plus că are o rotație zilnică, este mincinoasă și absurdă din punct de vedere filozofic, iar din punct de vedere teologic este cel puțin eronată".

Această concluzie, în care ignoranța legilor naturii și credința în infaibilitatea dogmelor religiei se amestecă cu falsul „bun simț", dovedește în modul cel mai convingător forța spiritului și gîndirii lui Copernic și a urmașilor săi, care s-au lepădat în mod atît de hotărît de „adevărurile" secolului al XVII-lea.

Dar să ne întoarcem la întrebarea pusă mai înainte.

Dacă viteza observatorului variază sau dacă observatorul se rotește, el trebuie să fie scos din rîndul observatorilor „corecți". Se știe însă că tocmai în aceste condiții se găsește un observator de pe Pămînt. Dar dacă variația vitezei sau rotația observatorului în timpul cînd studiază mișcarea este mică, acest observator poate fi considerat în mod convențional ca „corect". Oare această condiție este îndeplinită de un observator de pe globul pămîntesc?

Pămîntul se rotește într-o secundă cu $\frac{1}{240}$ dintr-un grad, adică aproximativ cu 0,000 07 radiani. Aceasta nu-i prea mult. De aceea, în ceea ce privește foarte multe fenomene, Pămîntul este un sistem complet inerțial. Însă în cazul fenomenelor de lungă durată, nu se poate face abstracție de rotația Pămîntului.

Sub cupola catedralei Sfîntul Isac din Leningrad era atîrnat într-un timp un pendul enorm. Dacă se punea acest pendul în mișcare oscilatorie, după un timp relativ scurt se putea observa că planul său de oscilație se rotea încet. După cîteva ore, planul de oscilație se rotea cu un unghi destul de mare. O astfel de experiență cu un astfel de pendul a fost făcută pentru prima oară de savantul francez Foucault și de atunci îi poartă numele. Experiența lui Foucault arată în mod sugestiv că Pămîntul se rotește (fig. 13).

Așadar, dacă mișcarea studiată durează un timp îndelungat, sîntem siliți să renunțăm la serviciile observatorului terestru, și să luăm ca bază un sistem de referință în legătură cu Soarele și cu stelele. De un astfel de sistem s-a servit Copernic, care considera soarele și stelele care ne înconjură ca fixe.

În realitate însă sistemul lui Copernic nu este perfect inerțial.

Universul constă dintr-o mulțime de îngrămădiri de stele, de insule ale lui, care se numesc galaxii. În galaxia din care face parte sistemul nostru solar se găsesc aproximativ o sută de miliarde de stele. În jurul centrului acestei galaxii, Soarele se rotește cu o perioadă de 180 milioane de ani cu o viteză de 250 km/s.

Ce eroare se va face, însă dacă se consideră că un observator solar este inerțial?

Pentru a compara meritele observatorului terestru cu ale celui solar, să calculăm cu ce unghi se va roti sistemul solar de referință într-o secundă. Dacă o rotație completă se execută în $180 \cdot 10^6$ a ($\sim 6 \cdot 10^{15}$s), într-o secundă sistemul solar de referință se va roti cu $6 \cdot 10^{-14}$ grade sau cu un unghi de 10^{-15} radiani. Se poate spune că

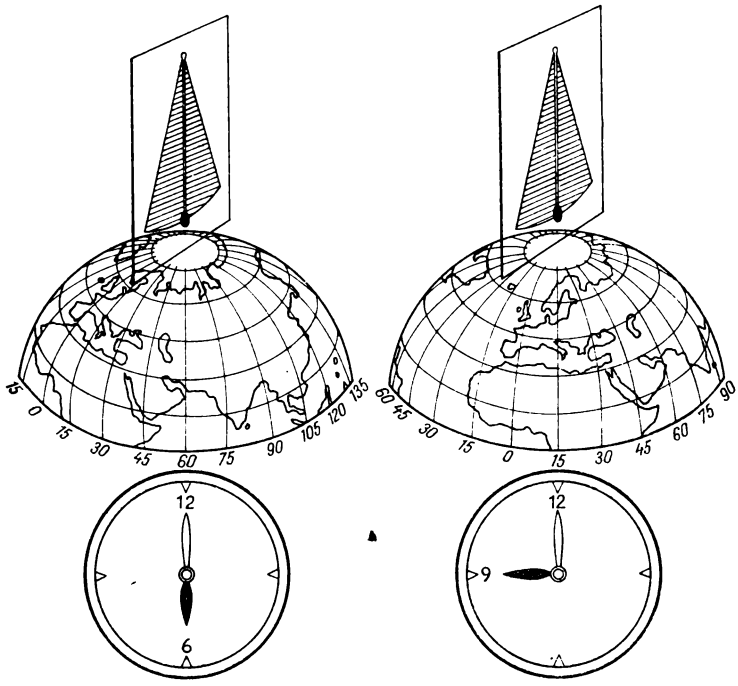


FIG. 13

observatorul solar este de 100 miliarde de ori „mai bun" decît cel terestru.

Cînd vor să se apropie și mai mult de un sistem inerțial, astronomii consideră un sistem de referință în legătură cu mai multe galaxii. Un astfel de sistem de referință este cel mai inerțial dintre toate sistemele posibile. Este imposibil să se găsească un sistem și mai bun.

Astronomii pot fi numiți observatori siderali în două înțelesuri: ei observă stelele și descriu mișcările corpurilor cerești din punctul de vedere al stelelor.

Accelerația

Pentru a caracteriza variația vitezei, fizica se servește de noțiunea de accelerație.

Se numește accelerație variația vitezei în unitatea de timp. În loc de a spune: „viteza unui corp variază cu cantitatea a într-o secundă", spunem mai pe scurt: „accelerația unui corp este egală cu a".

Dacă notăm cu v_1 viteza mișcării rectilinii în primul moment și cu v_2 viteza în momentul următor, regula de calcul a accelerației a se exprimă prin formula

$$a = \frac{v_2 - v_1}{t},$$

în care t este timpul în cursul căruia a crescut viteza.

Viteza se măsoară în centimetri pe secundă (sau în metri pe secundă) și așa mai departe, iar timpul, în secunde. Așadar, accelerația se măsoară în centimetri pe secundă. Numărul de centimetri pe secundă se împarte la secunde. Prin urmare, unitatea de accelerație va fi centimetri pe secundă la pătrat — cm/s^2 — (sau metri pe secundă la pătrat — m/s^2 — și așa mai departe).

Bineînțeles că accelerația poate varia în timpul mișcării, însă nu vom complica expunerea luînd în considerare și această variație. Vom presupune în mod tacit că în timpul mișcării, viteza crește uniform. O astfel de mișcare se numește uniform accelerată.

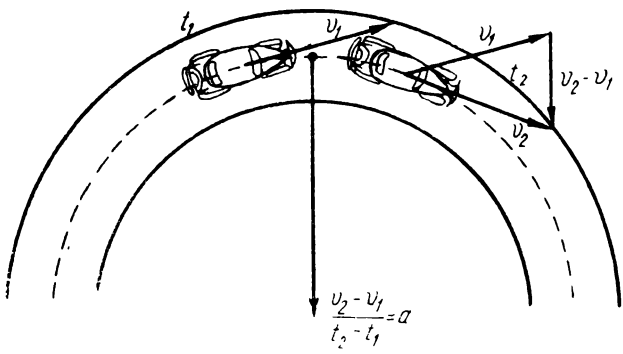


FIG. 14

Ce este accelerația în mișcare curbilinie?

Viteza este un vector, variația (diferența) de viteză este un vector și deci și accelerația este tot un vector. Pentru a găsi vectorul accelerației, trebuie să se împartă diferența vectorială a vitezelor

la timp. Am arătat deja cum se construiește vectorul variației vitezei.

O șosea face o curbă. Să luăm două poziții apropiate ale unui automobil și să reprezentăm vitezele ei prin vectori (fig. 14). Scăzînd acești vectori, vom obține o mărime care nu este nicidecum egală cu zero; împărțind-o la intervalul de timp, vom găsi valoarea accelerației. Apare o accelerație și atunci cînd viteza nu variază în timpul parcurgerii curbei. Mișcarea curbilinie este întotdeauna accelerată. Este neaccelerată numai mișcarea rectilinie uniformă.

Vorbind despre viteza de mișcare a unui corp, am stabilit dinainte, totdeauna, punctul de vedere asupra mișcării. Viteza corpului este relativă. Din punct de vedere al unui sistem inerțial, ea poate fi mare, dar din punct de vedere al altui sistem inerțial, ea poate fi mică. Nu este, oare, necesar să facem aceleași convenții cînd vorbim despre accelerație? Desigur că nu. Contrar vitezei, accelerația este absolută. Din punct de vedere al tuturor sistemelor inerțiale imaginabile, accelerația va fi una și aceeași. În adevăr, accelerația depinde de diferența de viteză a corpului între primul și al doilea moment, iar această diferență, după cum știm, va fi aceeași în orice sistem inerțial, adică este absolută.

Accelerația și forța

Dacă asupra unui corp nu acționează nici o forță, el se poate mișca numai fără accelerație. Dimpotrivă, acțiunea unei forțe asupra corpului are ca rezultat o accelerație, și anume accelerația corpului va fi cu atît mai mare cu cît forța este mai mare. Cu cît voim să punem mai repede în mișcare un cărucior încărcat, cu atît trebuie să ne încordăm mușchii mai mult. De regulă, asupra unui corp acționează două forțe: una de accelerare — forța de tracțiune — și alta de frînare —, forța de frecare sau rezistența aerului.

Diferența dintre aceste două forțe, așa-numita forță rezultantă, poate fi dirijată în sensul mișcării sau în sens contrar acesteia. În primul caz, mișcarea corpului devine mai rapidă, iar în al doilea se încetinește. Dacă aceste două forțe care acționează în sensuri contrare sînt egale una cu alta (se echilibrează), corpul se deplasează uniform, ca și cum asupra lui n-ar acționa nici o forță.

Care este însă legătura dintre forță și accelerația produsă de ea? Răspunsul este foarte simplu. Accelerația este proporțională cu forța;

$$a \sim F,$$

(Semnul $\sim$ înseamnă „proporțional").

Rămîne să se mai rezolve încă o problemă: cum influențează proprietățile corpului accelerarea mișcării acestuia sub efectul unei forțe oarecare? Aceeași forță, acționînd asupra unor corpuri diferite, le imprimă accelerații diferite.

Răspunsul la întrebare se găsește în faptul remarcabil că toate corpurile cad pe Pămînt cu aceeași accelerație. Această accelerație se notează cu litera g.

La prima vedere, observația directă nu confirmă că accelerația este identică pentru toate corpurile. Într-adevăr, cînd corpurile cad în condițiile obișnuite, asupra lor acționează, în afară de greutatea lor, și o forță „dăunătoare" — rezistența aerului. Diferența dintre modul cum cad corpurile ușoare și cele grele a pus în mare încurcătură pe filozofii din antichitate. O bucată de fier cade repede, iar un fulg plutește în aer. O foaie de hîrtie desfăcută cade încet pe Pămînt, dar dacă este făcută cocoloș, aceeași foaie cade mult mai repede. Faptul că aerul denaturează caracterul „real" al căderii corpurilor sub influența Pămîntului a fost constatat chiar de grecii antici. Democrit însă credea că, chiar dacă se suprimă aerul, corpurile grele vor cădea întotdeauna mai repede decît cele ușoare.

În treacăt fie zis, astăzi se fabrică sîrmă de metal așa de subțire (de cîțiva microni), încît plutește în aer ca un fulg.

Aristotel spunea că în vid toate corpurile ar trebui să cadă la fel, dar din această concepție teoretică, el a tras următoarea concluzie paradoxală: „căderea diferitelor corpuri cu aceeași viteză este așa de absurdă, încît e clar că existența vidului e imposibilă".

Nici unul dintre oamenii de știință din antichitate și din evul mediu nu s-a gîndit să verifice în practică dacă corpurile cad pe Pămînt cu accelerații diferite sau egale. Numai Galilei a demonstrat prin experiențele sale remarcabile (el a studiat mișcarea sferelor pe un plan înclinat și căderea corpurilor aruncate din vîrful turnului înclinat din Pisa) că toate corpurile, indiferent de masa lor, cad cu aceeași accelerație în același punct al globului pămîntesc. În prezent, aceste experiențe se pot face foarte simplu cu ajutorul unui tub lung, din care s-a scos aerul. Într-un astfel de tub, un fulg și o piatră cad absolut identic, căci asupra acestor corpuri acționează o singură forță — greutatea —, rezistența aerului fiind redusă la zero. Cînd lipsește rezistența aerului, căderea oricărui corp este o mișcare uniform accelerată.

Acum să revenim la întrebarea pusă mai înainte: cum influențează proprietățile corpului accelerarea mișcării acestuia sub acțiunea unei forțe date?

Legea lui Galilei spune că toate corpurile, indiferent de masa lor, cad cu aceeași accelerație; prin urmare, o masă m [kg], sub influența unei forțe de m [kgf], se mișcă cu accelerația g.

Acum să presupunem că nu este vorba de căderea corpurilor și că asupra masei m [kg] acționează o forță de 1 kgf. Întrucît accelerația este proporțională cu forța, ea va fi de m ori mai mică decît g.

Am ajuns astfel la concluzia că accelerația a a unui corp, în cazul unei forțe date (în exemplul nostru, de 1 kgf), este invers proporțională cu masa.

Unind ambele concluzii, rezultă că

$$a \sim \frac{F}{m},$$

adică, dacă masa nu variază, accelerația este proporțională cu forța, iar dacă forța nu variază, ea este invers proporțională cu masa.

Legea care leagă accelerația de masa corpului și de forța care acționează asupra lui a fost descoperită de marele savant englez Isaac Newton (1643—1727) și-i poartă numele[1].

Accelerația este proporțională cu forța care acționează și invers proporțională cu masa corpului; ea nu depinde de nici o însușire a corpului. Din legea lui Newton rezultă că tocmai masa este unitatea de măsură a „gradului de inerție" a unui corp. Dacă forțele sînt egale, este mai greu de accelerat un corp cu masă mare. Vedem că noțiunea de masă, cu care am făcut cunoștință ca fiind o mărime „simplă", care se determină prin cîntărire cu o balanță, a căpătat un nou înțeles mai adînc: masa caracterizează însușirile dinamice ale unui corp.

Putem scrie legea lui Newton astfel:

$$kF = ma,$$

în care k este un coeficient constant. Acest coeficient depinde de unitățile alese.

În loc de a ne servi de unitatea de față (kgf) de care dispunem deja, vom proceda în alt mod. Așa cum caută adesea să facă fizicienii, vom alege unitatea de forță în așa fel, încît coeficientul de proporționalitate din legea lui Newton să fie egal cu unitatea. Atunci, legea lui Newton va lua următoarea formă:

$$F = ma.$$

[1] Însuși Newton spune că mișcarea ascultă de trei legi. Legea despre care este vorba aici apare la Newton sub numărul doi. Prima lege a fost numită de el legea inerției, iar a treia poartă numele de legea acțiunii și reacțiunii.

ISAAC NEWTON (1643—1727), genial fizician și matematician englez, unul din cei mai mari savanți din istoria omenirii. Newton a formulat noțiunile fundamentale și legile mecanicii, a descoperit legea gravitației universale, creînd astfel o concepție despre lume care a rămas neatinsă pînă la începutul secolului al XX-lea. El a elaborat teoria mișcării corpurilor cerești, a explicat particularitățile cele mai importante ale mișcării Lunii, a dat explicația fluxului și refluxului. În optică, Newton a făcut descoperiri remarcabile, care au contribuit la dezvoltarea furtunoasă a acestui capitol al fizicii. Newton a elaborat o metodă interesantă de cercetare a naturii prin mijloace matematice; el are meritul de a fi inventat calculul diferențial și integral. Acest lucru a avut o influență enormă asupra întregii dezvoltări ulterioare a fiziții și a contribuit la introducerea metodelor matematice de cercetare în fizică.

După cum am mai spus, în fizică se obișnuiește să se măsoare masa în grame, distanța în centimetri, iar timpul în secunde. Sistemul de unități bazat pe aceste trei mărimi fundamentale se numește sistemul CGS.

Acum, servindu-ne de principiul formulat mai înainte, vom alege unitatea de forță. Evident că o forță este egală cu unitatea, în cazul în care se imprimă unei mase de 1 kg o accelerație de 1 cm/s^2. Această forță a căpătat în sistemul CGS denumirea de dină (dyn).

Conform legii lui Newton, $F = ma$, forța se exprimă în dine, dacă masa nu este în grame, iar accelerația a în centimetri pe secundă la pătrat (cm/s^2). De aceea se face uz de următorul mod de a scrie:

$$1 \text{ dyn} = 1 \frac{\text{g} \cdot \text{cm}}{\text{s}^2},$$

Greutatea unui corp se notează, de obicei, cu litera G. Forța G imprimă corpului accelerația g și, evident, în dine,

$$G = mg.$$

Am avut însă deja o unitate de forță — kilogramul-forță (kgf). Legătura dintre noua și vechea unitate se găsește imediat din ultima formulă:

$$1 \text{ kgf} = 981\,000 \text{ dyn}.$$

Dina este o unitate de forță foarte mică. Ea este aproximativ egală cu greutatea unui miligram.

Am mai pomenit de noul sistem de unități SI. Denumirea de newton (N) a noii unități de forță este pe deplin meritată. Alegîndu-se unitățile în modul acesta, legea lui Newton se va putea scrie cel mai simplu, iar această unitate se definește astfel:

$$1 \text{ N} = 1 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2},$$

în care 1 N este forța care comunică unei mase de 1 kg o accelerație de 1 m/s^2.

Această nouă unitate se poate pune cu ușurință în legătură cu dina și cu kilogramul, astfel:

$$1 \text{ N} = 100\,000 \text{ dyn} = \frac{1}{9{,}8} \text{ kgf}.$$

Mișcarea rectilinie cu accelerație constantă

Conform legii lui Newton, un corp are o astfel de mișcare, atunci cînd asupra respectivului corp acționează în total o forță constantă, care accelerează sau frînează corpul.

Deși nu absolut exact, asemenea condiții se ivesc destul de des; un automobil, mergînd cu motorul debreiat, se frînează sub influența forței aproximativ constante de frecare.

Cunoscînd mărimea forței rezultante, precum și masa corpului, vom găsi, cu ajutorul formulei $a = \frac{F}{m}$, mărimea accelerației. Întrucît

$$a = \frac{v - v_0}{t},$$

în care t este timpul mișcării, v este viteza finală, iar v_0 este viteza inițială, cu ajutorul acestei formule se poate răspunde la o serie de întrebări, de următoarea natură: după cît timp se va opri un tren, dacă se cunosc forța de frînare, masa trenului și viteza lui inițială? Pînă la ce viteză se va accelera un automobil, dacă se cunoaște forța motorului, rezistența, masa mașinii și timpul de accelerare?

Adesea ne interesează să cunoaștem lungimea drumului parcurs de un corp în mișcare uniform accelerată. Dacă mișcarea este uniformă, drumul parcurs se găsește prin înmulțirea vitezei cu timpul mișcării. Dacă mișcarea este uniform accelerată, calculul mărimii drumului parcurs se face astfel ca și cum corpul s-ar mișca în același interval de timp t în mod uniform cu o viteză egală cu semisuma vitezelor inițială și finală.

$$S = \frac{1}{2}(v_0 + v)\, t.$$

Așadar, în cazul mișcării uniform accelerate (sau întîrziate), drumul parcurs de un corp este egal cu produsul dintre semisuma vitezelor inițială și finală și timpul mișcării. Același drum va fi parcurs în același interval de timp în cazul mișcării uniforme cu viteza $\frac{1}{2}(v_0 + v)$. Prin urmare, se poate spune că $\frac{1}{2}(v_0 + v)$ este viteza medie a mișcării uniform accelerate.

E util să se scrie o formulă care să arate dependența drumului parcurs de accelerație. Substituind $v = v_0 + at$ în ultima formulă, găsim că

$$S = v_0 t + \frac{at^2}{2}$$

sau, dacă mișcarea are loc fără viteză inițială, atunci

$$s = \frac{at^2}{2}.$$

Dacă într-o secundă un corp a parcurs 5 m, în două secunde va parcurge (4×5) m, în trei secunde (9×5) m, și așa mai departe. Drumul parcurs crește proporțional cu pătratul timpului.

După această regulă cade un corp greu. Accelerația în căderea liberă este g, iar formula capătă forma următoare:

$$s[\text{cm}] = \frac{981}{2} \cdot t^2,$$

dacă t este dat în secunde.

Dacă un corp ar putea cădea fără nici o piedică vreo 100 s, el ar parcurge de la începutul căderii un drum enorm de circa 50 km. În acest caz, în primele 10 s se va parcurge doar $\frac{1}{2}$ km; iată deci ce înseamnă mișcarea accelerată.

Dar ce viteză va căpăta un corp cînd cade de la o înălțime dată? Pentru a răspunde la această întrebare, avem nevoie de o formulă care să lege drumul parcurs cu accelerația și cu viteza. Substituind în $s = \frac{1}{2}(v_0 + v)t$ valoarea timpului mișcării $t = \frac{v - v_0}{a}$, obținem

$$s = \frac{1}{2a}(v^2 - v_0^2)$$

sau, dacă viteza inițială este egală cu zero,

$$s = \frac{v^2}{2a}, \text{ iar } v = \sqrt{2as}.$$

Zece metri este înălțimea unei case destul de mici cu parter și unul sau două etaje. De ce este periculos să se sară de pe acoperișul unei astfel de case? Un calcul simplu arată că viteza căderii libere atinge în acest caz valoarea $v = \sqrt{2 \cdot 9{,}8 \cdot 10}$ m/s = 14 m/s ≈ ≈ 50 km/h, iar aceasta este viteza maximă permisă a unui automobil în oraș.

Rezistența aerului nu micșorează prea mult această viteză.

Formulele deduse de noi se folosesc în cele mai diferite calcule. Le vom utiliza spre a examina cum se produce mișcarea pe Lună.

În romanul lui Wells, *Primii oameni în Lună*, se povestesc întîmplările extraordinare ale unor călători în timpul plimbărilor

lor fantastice. Pe Lună, accelerarea gravitației este de aproximativ șase ori mai mică decît pe Pămînt. Dacă pe Pămînt un corp care cade parcurge în prima secundă 5 m, pe Lună el „plutește" în jos doar 80 cm (accelerația este de aproximativ 1,6 m/s^2).

Formulele de mai înainte permit să se calculeze repede „minunile" Lunii.

O săritură de la înălțimea h durează un timp $t = \sqrt{\frac{2h}{g}}$. Întrucît accelerația pe Lună este de șase ori mai mică, acolo e nevoie pentru a face o săritură de la aceeași înălțime de un timp de $\sqrt{6} \approx 2{,}45$ ori mai lung. De cîte ori se micșorează însă viteza finală pe care o atinge corpul respectiv $(v = \sqrt{2gh})$?

Pe Lună se poate sări fără pericol de pe acoperișul unei case cu parter și două etaje. Înălțimea care poate fi sărită cu aceeași viteză inițială $\left(\text{formula } h = \frac{v^2}{2g}\right)$ este de șase ori mai mare. Un copil poate sări deci la o înălțime care depășește recordul unui campion mondial pe Pămînt.

Traiectoria glonțului

Omul a căutat din timpuri imemoriale să găsească mijlocul de a arunca un obiect la o distanță cît mai mare. Piatra aruncată cu mîna sau cu praștia, săgeata trimisă din arc, glonțul de pușcă, proiectilul de artilerie, racheta balistică — iată o scurtă enumerare de succese realizate în acest domeniu.

Un obiect aruncat se deplasează pe o linie curbă, numită parabolă. O asemenea curbă se poate construi fără dificultate, dacă se consideră mișcarea corpului aruncat ca sumă a două mișcări — pe orizontală și pe verticală — care au loc simultan și independent. Accelerația gravitației este verticală și de aceea glonțul se deplasează pe orizontală în virtutea inerției, cu viteză constantă, și în același timp cade pe verticală, cu accelerație constantă, spre Pămînt. Cum se pot compune aceste două mișcări?

Vom începe cu cazul cel mai simplu, cînd viteza inițială este dirijată pe orizontală (de exemplu, o pușcă a cărei țeavă este orizontală).

Să luăm o foaie de hîrtie milimetrică și să ducem o dreaptă verticală și una orizontală (fig. 15). Întrucît cele două mișcări au loc independent una de alta, după t secunde, corpul se va deplasa cu

segmentul $v_0 t$ spre dreapta și cu segmentul $\frac{gt^2}{2}$ în jos. Să luăm pe orizontală segmentul $v_0 t$ și să ducem din extremitatea lui segmentul vertical $\frac{gt^2}{2}$. Extremitatea segmentului vertical indică punctul în care se va găsi corpul după t secunde.

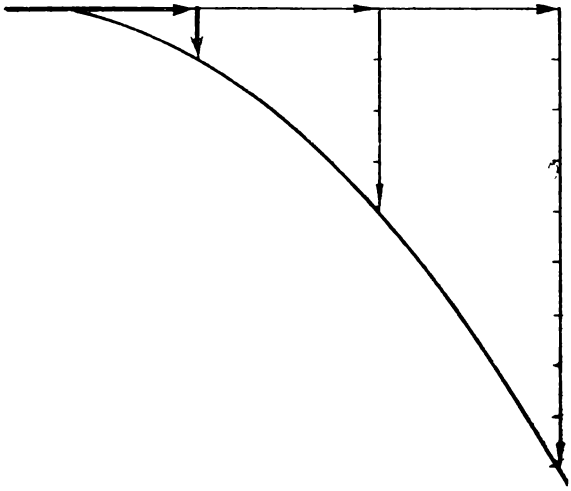


FIG. 15

Această construcție trebuie făcută pentru mai multe puncte, adică pentru mai multe momente. Prin aceste puncte trece o curbă continuă — o parabolă — care reprezintă traiectoria glonțului.

În fig. 16 este construită traiectoria pentru cazul în care viteza inițială v_0 face un unghi cu orizontala.

În primul rînd trebuie să se descompună vectorul v_0 într-o componentă verticală și una orizontală. Pe linia orizontală vom lua segmentul $v_{oriz} t$, care reprezintă drumul parcurs de glonț pe orizontală după t secunde.

Dar glonțul execută în același timp o mișcare în sus. După t secunde, corpul se va ridica la înălțimea $h = v_{vert} t - \frac{gt^2}{2}$. Cu această formulă, substituind în ea momentele care ne interesează, se vor calcula deplasările verticale și se vor lua pe axa verticală. Valorile lui h mai întîi vor crește (glonțul se va deplasa în sus), iar după aceea vor descrește.

Acum rămîne să marcăm pe diagramă punctele traiectoriei în același fel ca în exemplul precedent și să ducem prin ele o linie continuă.

Dacă țeava pușii este orizontală, glonțul se va îngropa repede în pămînt; dacă poziția țevii este verticală, glonțul va cădea pe

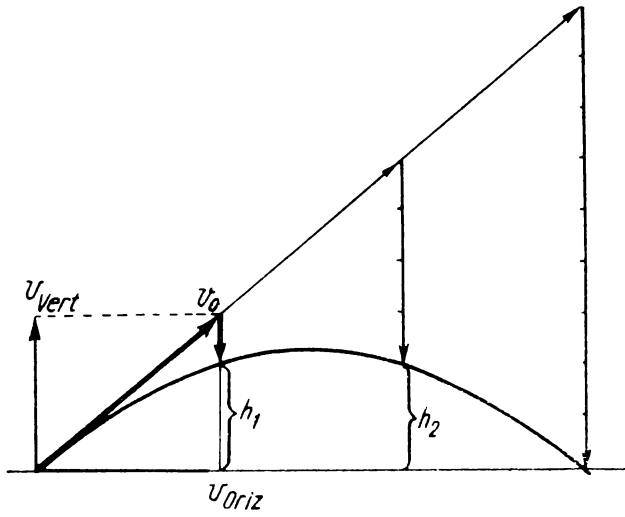


FIG. 16

locul de unde a fost tras. Deci, pentru a trage la distanță cît mai mare, trebuie ca țeava pușii să se afle într-o poziție înclinată față de orizontală. Dar cît de mare trebuie să fie această înclinare?

Vom aplica același procedeu, adică vom descompune vectorul vitezei inițiale în două componente: pe verticală, viteza este v_1, iar pe orizontală, ea este v_2. Timpul care trece din momentul cînd se trage glonțul pînă în momentul cînd acesta atinge punctul cel mai înalt al traiectoriei este egal cu v_1/g. Atragem atenția asupra faptului că în tot atîta timp glonțul va cădea în jos, adică timpul total care se scurge pînă ce glonțul va cădea pe Pămînt este $\frac{2v_1}{g}$.

Întrucît mișcarea pe orizontală este uniformă, bătaia pușii va fi

$$s = \frac{2v_1 v_2}{g}.$$

(am neglijat înălțimea la care se găsește pușca deasupra Pămîntului.)

Am obținut o formulă care arată că bătaia puștii este proporțională cu produsul componentelor vitezei. Care este direcția țevii pentru care acest produs este maxim? Această întrebare se poate exprima în limbaj geometric. Vitezele v_1 și v_2 formează dreptunghiul vitezelor; diagonala acestuia reprezintă viteza totală v. Produsul v_1v_2 este egal cu aria acestui dreptunghi.

Întrebarea de mai înainte se reduce la următoarea: fiind dată lungimea diagonalei, ce lungime trebuie să aibă laturile pentru ca aria dreptunghiului să fie maximă? În geometrie se demonstrează că pătratul satisface această condiție. Așadar, bătaia puștii va fi maximă cînd $v_1 = v_2$, adică atunci cînd dreptunghiul vitezelor devine un pătrat. Diagonala pătratului vitezelor formează cu orizontala un unghi de 45°; sub acest unghi trebuie să se țină pușca pentru ca glonțul să meargă cît mai departe.

Dacă v este viteza totală a glonțului, în cazul pătratului $v_1 = v_2 = \frac{v}{\sqrt{2}}$. Formula bătăii puștii pentru acest caz optim este $s = \frac{v^2}{g}$, adică bătaia va fi de două ori mai mare decît în cazul în care se trage în sus, pe verticală, cu aceeași viteză inițială.

Înălțimea la care se ridică glonțul cînd se trage sub un unghi de 45° va fi $h = \frac{v_1^2}{2g} = \frac{v^2}{4g}$, adică este de cinci ori mai mică decît bătaia.

Trebuie să se țină seama că formulele cu care am lucrat mai înainte dau rezultate precise numai în cazul, destul de neobișnuit în practică, cînd nu există aer. Rezistența aerului joacă în multe cazuri un rol hotărîtor și modifică radical întreaga situație.

Mișcarea circulară

Dacă un punct se deplasează pe un cerc, mișcarea sa este accelerată, chiar numai pentru motivul că viteza își schimbă în fiecare moment direcția. Viteza poate rămîne constantă ca mărime și tocmai asupra acestui caz ne vom concentra atenția.

Vom desena vectorii vitezei la intervale succesive de timp, luînd originea vectorilor în același punct. (Avem dreptul s-o facem.) Dacă vectorul vitezei s-a rotit cu un unghi mic, variația vitezei, după cum vedem, se reprezintă prin baza unui triunghi isoscel. Să construim variația vitezei în timpul unei rotații complete a cercului (fig. 17). Suma mărimilor variațiilor vitezei în

timpul unei rotații complete va fi egală cu suma laturilor poligonului reprezentat în această figură. Cînd am construit fiecare triunghi, am presupus, în mod tacit, că vectorul vitezei a variat sub formă de salt, dar în realitate direcția vitezei vectorului s-a schimbat în mod continuu. E absolut clar că eroarea va fi cu atît mai mică, cu cît unghiul la vîrf al triunghiului isoscel va fi luat mai mic. Cu cît laturile poligonului vor fi mai mici, cu atît el se va apropia mai mult de un cerc cu raza v. De aceea, valoarea exactă a sumei valorilor absolute ale variațiilor vitezei în timpul rotației unui punct va fi lungimea cercului $2\pi v$. Valoarea accelerației se va găsi prin împărțirea ei la timpul T al unei rotații complete.

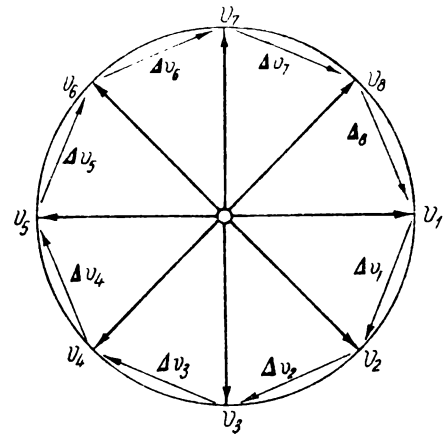


FIG. 17

Așadar, accelerația în mișcare uniformă pe un cerc se exprimă prin formula $a = \frac{2\pi v}{T}$.

Dar timpul unei rotații complete, în cazul mișcării pe un cerc cu raza R poate fi scris sub forma $T = \frac{2\pi R}{v}$. Substituind această expresie în formula precedentă, obținem pentru accelerație expresia $a = \frac{v^2}{R}$.

Dacă raza de rotație este constantă, accelerația este proporțională cu pătratul vitezei. La o viteză dată, accelerația este invers proporțională cu raza.

Același raționament ne arată care este în fiecare moment direcția mișcării circulare. Cu cît unghiul la vîrf al triunghiurilor isoscele, de care ne-am servit pentru demonstrație, este mai mic, cu atît unghiul dintre creșterea vitezei și viteză este mai apropiat de 90°.

Prin urmare, accelerația mișcării circulare uniforme este perpendiculară pe viteză. Dar ce direcție are viteza și accelerația față de traiectorie? Întrucît viteza este tangentă la traiectorie, accele-

rația este dirijată pe direcția razei, și anume spre centrul cercului (fig. 18).

Încercați să învîrtiți o piatră legată cu o sfoară. Veți simți că în acest scop este nevoie să depuneți un efort muscular apreciabil. De ce este nevoie de această forță, de vreme ce corpul se mișcă uniform? Tocmai aceasta e chestiunea, că mișcarea nu este uniformă. Corpul se mișcă, în adevăr, cu viteză constantă ca valoare, dar variația neîncetată a direcției vitezei face ca această mișcare să devină accelerată. Forța este necesară pentru a abate corpul de la traiectoria rectilinie pe care tinde să se deplaseze datorită inerției. E nevoie de o forță pentru a crea accelerația v^2/R, pe care am calculat-o mai înainte.

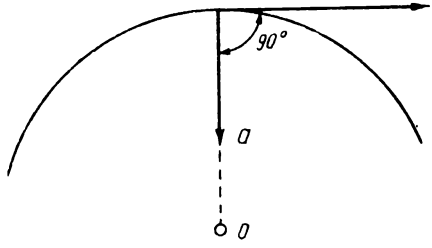


FIG. 18

Conform legii lui Newton, direcția accelerației coincide cu cea a forței. Așadar, un corp care se rotește pe un cerc cu viteză constantă trebuie să se găsească sub influența unei forțe dirijate pe direcția razei spre centrul de rotație. Forța care acționează asupra pietrei din partea sforii asigură accelerația v^2/R. Deci, mărimea acestei forțe este mv^2/R.

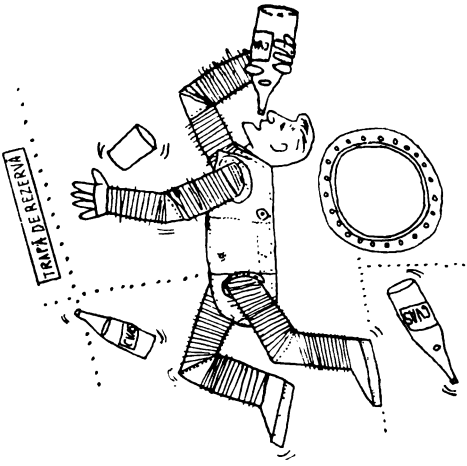
Sfoara trage de piatră, iar piatra trage de sfoară. În aceste două forțe recunoaștem „obiectul și imaginea sa în oglindă" — forțele acțiunii și reacțiunii. Adesea forța cu care piatra acționează asupra pietrei se numește centrifugă. Bineînțeles că forța centrifugă este egală cu mv^2/R și este dirijată pe direcția razei, de la centrul de rotație spre periferie. Forța centrifugă este aplicată corpului care reacționează cu tendința inerțială a corpului care se rotește de a se mișca rectiliniu.

Cele menționate mai înainte se aplică și la cazul în care rolul de „sfoară" îl joacă forța gravitației. Luna se rotește în jurul Pămîntului. Ce reține pe satelitul nostru de a se depărta de Pămînt? De ce, ascultînd de legea inerției, ea nu pornește într-o călătorie interplanetară? Pămîntul reține Luna cu o „sfoară invizibilă": forța de atracție. Această forță este egală cu mv^2/R, în care v este viteza mișcării Lunii pe orbită, iar R este distanța pînă la Lună. Forța centrifugă este aplicată în acest caz Pămîntului, dar datorită marii mase a acestuia, se influențează doar într-o măsură neînsemnată mișcarea planetei noastre.

Să presupunem că trebuie să punem un satelit artificial al Pămîntului pe o orbită circulară, la distanța de 300 km de suprafața Pămîntului. Care trebuie să fie viteza acestui satelit? La distanța de 300 km, accelerația gravitației este ceva mai mică decît la suprafața Pămîntului, fiind egală cu 8,9 m/s^2. Accelerația satelitului, care se deplasează pe un cerc, este egală cu v^2/R, unde R este distanța de la centrul de rotație (adică de la centrul Pămîntului), egală aproximativ cu 6 600 km $= 6{,}6 \cdot 10^6$ m. Pe de altă parte, această accelerație este egală cu accelerația gravitației g. Prin urmare, $g = \frac{v^2}{R}$, de unde găsim viteza cu care se mișcă satelitul pe orbita sa

$$v = \sqrt{gR} = \sqrt{8{,}9 \cdot 6{,}6 \cdot 10^6} = 7\ 700 \text{ m/s} = 7{,}7 \text{ km/s}.$$

Viteza minimă necesară pentru ca un corp aruncat orizontal să devină satelit al Pămîntului se numește prima viteză cosmică. Din exemplul de mai înainte se vede că această viteză este apropiată de 8 km/s.



III

Mişcarea din punct de vedere „iraţional"

Principiul echivalenţei

În capitolul precedent am găsit „punctul de vedere raţional" asupra mişcării. E drept că exista o mulţime nesfîrşită de puncte de vedere „raţionale", pe care le-am numit sisteme inerţiale.

Acum, înarmaţi cu cunoaşterea legilor mişcării, ne putem interesa de felul cum se prezintă mişcarea din punctele de vedere „iraţionale". Interesul pentru modul cum trăiesc locuitorii sistemelor neinerţiale nu este de loc lipsit de utilitate, deoarece noi înşine sîntem locuitori ai unui astfel de sistem.

Să presupunem că, după ce am pus mîna pe nişte instrumente de măsură, ne-am închis într-o navă interplanetară şi am pornit în călătorie prin lumea stelelor.

Vremea trece repede. Soarele a rămas departe în urmă devenind de mărimea unei steluţe mici. Motorul a fost oprit şi nava este departe de corpurile care ar atrage-o.

Să vedem acum ce se întîmplă în laboratorul nostru zburător. De ce termometrul care s-a desprins din cui pluteşte în aer şi nu cade pe duşumea? În ce poziţie ciudată s-a oprit pendulul atîrnat pe perete, după ce s-a abătut de la „verticală"! Vom găsi imediat dezlegarea enigmei: nava nu se găseşte pe Pămînt, ci în spaţiul interplanetar, unde obiectele nu mai au greutate.

După ce am admirat acest tablou neobişnuit, hotărîm să schimbăm direcţia. Apăsînd pe un buton, pornim motorul cu reacţie şi deodată... obiectele care ne înconjoară parcă au prins viaţă. Toate corpurile care nu erau fixate solid au început să se mişte.

Termometrul a căzut, pendulul a început să oscileze și, trecînd treptat în stare de repaus, a ajuns în poziție verticală, iar perna s-a turtit supusă sub apăsarea valizei puse pe ea. Ne uităm la instrumentele care indică în ce direcție a început nava noastră mișcarea sa accelerată. Instrumentele arată că au căpătat o mișcare cu accelerație de 9,8 m/s^2, care este mică în raport cu posibilitățile navei. Simțurile noastre sînt absolut normale și ne simțim ca pe Pămînt. Dar de ce? Nava se găsește, ca și mai înainte, la o depărtare neînchipuit de mare de masele care ar putea-o atrage, nu există nici o forță de atracție, dar obiectele au dobîndit greutate.

Dăm drumul din mînă unei bile și măsurăm cu ce accelerație cade pe podeaua navei. Constatăm că accelerația este de 9,8 m/s^2. Am citit această cifră adineauri la instrumentele care măsoară accelerația rachetei. Nava se deplasează în sus cu aceeași accelerație cu care cad corpurile în jos în laboratorul nostru zburător.

Dar ce înseamnă „în sus" și „în jos" în nava zburătoare? Ce simplu era cînd trăiam pe Pămînt! Acolo cerul era sus, iar Pămîntul era jos. Dar acum? Susul nostru are un sens indiscutabil: este sensul accelerației rachetei.

Nu este greu de priceput înțelesul observațiilor noastre: asupra bilei căreia i-am dat drumul din mînă nu acționează nici o forță. Bila se mișcă în virtutea inerției. Racheta se mișcă cu o anumită accelerație în raport cu bila, dar nouă, celor care ne găsim în rachetă, ni se pare că bila „cade" în sens opus accelerației rachetei. Bineînțeles că accelerația acestei „căderi" este egală ca mărime cu accelerația reală a rachetei. Este, de asemenea, evident că toate corpurile din rachetă vor „cădea" cu aceeași accelerație.

Din cele precedente putem trage o concluzie interesantă. În racheta care se deplasează accelerat, corpurile încep „să aibă greutate", iar „forța de atracție" respectivă este dirijată în sens opus accelerației rachetei, accelerația „căderii" libere fiind numeric egală cu accelerația mișcării navei-rachetă. Lucrul cel mai remarcabil este că, în practică, nu putem deosebi accelerația mișcării sistemului de accelerația gravitațională[1]. Cînd ne găsim în nava cosmică cu ferestrele închise, nu ne putem da seama dacă stă în repaus sau se deplasează cu accelerația de 9,8 m/s^2. Echivalența

[1] Numai în practică. În principiu există o diferență. Pe Pămînt, direcțiile forței gravitaționale sînt dirijate după raze spre centrul Pămîntului. Aceasta înseamnă că direcțiile accelerațiilor în două puncte diferite formează între ele un unghi. Într-o rachetă care se mișcă accelerat, direcțiile accelerației în toate punctele sînt riguros paralele. Pe pămînt, accelerația gravitațională variază și cu înălțimea, pe cînd într-o rachetă cu mișcare accelerată, acest efect nu există.

accelerației cu acțiunea forței gravitaționale se numește în fizică principiul echivalenței.

Acest principiu, după cum se va vedea în multe exemple, permite să se rezolve repede multe probleme, adăugînd la forțele reale — forța fictivă gravitațională existentă în sistemele cu mișcare accelerată.

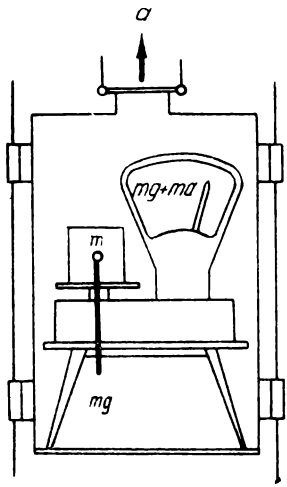


FIG. 19

Primul exemplu este ascensorul. Să luăm cu noi un cîntar cu arc cu niște greutăți de metal și să pornim cu ascensorul în sus. Să urmărim cum reacționează acest indicator al cîntarului pe care s-a pus o greutate de 1 kg (fig. 19). După începerea mișcării ascensorului, vom vedea că indicațiile cîntarului s-au mărit, ca și cum greutatea de metal a început să cîntărească mai mult de un kilogram. Acest fapt se poate explica cu ușurință cu ajutorul principiului echivalenței. În timpul mișcării ascensorului în sus cu accelerația a, ia naștere o forță suplimentară de greutate, dirijată în jos. Întrucît accelerația datorită acestei forțe este egală cu a, greutatea suplimentară este ma. Prin urmare, cîntarul va indica o greutate $mg + ma$. După ce accelerația va dispare și ascensorul se va mișca uniform, resortul va reveni la poziția inițială arătînd o greutate de 1 kgf. Ne apropiem de etajul cel mai de sus și mișcarea ascensorului se încetinește. Ce se va întîmpla acum cu resortul cîntarului? Desigur, acum greutatea de metal va cîntări mai puțin de 1 kg. În timpul încetinirii mișcării ascensorului, vectorul accelerației va fi dirijat în jos. Așadar, forța suplimentară fictivă de greutate va fi dirijată în sus, în sens contrar accelerației gravitaționale pămîntești. Acum a este negativ, iar cîntarul arată o valoare mai mică decît mg. După ce ascensorul s-a oprit, resortul revine în poziția inițială. Începem coborîrea. Mișcarea ascensorului se accelerează; vectorul accelerației este dirijat în jos și deci forța suplimentară de greutate este dirijată în sus. Acum greutatea de metal cîntărește mai puțin de 1 kg. Cînd mișcarea devine uniformă, gravitația suplimentară dispare, iar la sfîrșitul călătoriei noastre cu ascensorul — cînd mișcarea în jos se încetinește — greutatea va cîntări mai mult de 1 kg.

Senzațiile neplăcute resimțite în timpul accelerării și încetinirii rapide a mișcării unui ascensor se datoresc variațiilor de greutate studiate mai înainte.

Dacă ascensorul va cădea accelerat, corpurile care se găsesc în el vor părea că devin mai ușoare. Cu cît această accelerație va fi mai mare, cu atît pierderea de greutate va fi mai mare. Ce se întîmplă însă în cazul căderii libere a sistemului? Răspunsul este clar: în acest caz, corpurile nu vor mai apăsa pe suportul lor, adică nu vor mai avea greutate; forța de atracție a Pămîntului va fi echilibrată de forța suplimentară de greutate existentă într-un astfel de sistem în cădere liberă. Cînd cineva se găsește într-un astfel de „ascensor", el poate ține fără dificultate pe umeri o greutate de o tonă.

La începutul acestui paragraf am descris viața „fără greutate" într-o navă interplanetară care a ieșit din limitele sferei de atracție gravitațională. În cazul mișcării uniforme și rectilinii nu există greutate într-o astfel de navă, dar același lucru se întîmplă și în cazul căderii libere a sistemului. Așadar, nu este nevoie să se iasă din limitele sferei de atracție gravitațională, căci nu există greutate în nici o navă interplanetară care se deplasează cu motorul oprit. Căderea liberă face ca greutatea să dispară în aceste sisteme. Principiul echivalenței ne-a condus la concluzia că un sistem de referință care se mișcă rectiliniu și uniform la mare depărtare de efectul forțelor de atracție și un sistem de referință care cade liber sub influența forței gravitaționale sînt aproape perfect echivalente (vezi observația de la p. 53). În primul sistem nu există greutate, iar în cel de-al doilea, „greutatea dirijată în jos" este echilibrată de „greutatea dirijată în sus". Între aceste sisteme nu găsim nici o diferență.

Într-un satelit artificial al Pămîntului, viața „fără greutate" începe din momentul cînd nava a fost pusă pe orbită și începe să se deplaseze fără a mai fi propulsată de rachetă.

Viața în cabina unei astfel de nave nu se poate numi obișnuită. A fost nevoie de multă inventivitate și ingeniozitate pentru a face ca obiectele care se supun ușor forței gravitaționale să asculte de om. De exemplu, este posibil să se toarne apă dintr-o sticlă în pahar? Se știe că apa curge „în jos" datorită atracției gravitaționale. Se poate prepara mîncare dacă nu se poate încălzi apă pe plită? (Apa caldă nu se va amesteca cu cea rece în lipsa atracției gravitaționale.) Cum se poate scrie cu creionul pe hîrtie dacă apăsarea atît de ușoară a creionului asupra mesei este suficientă ca să respingă pe cel ce scrie? Nici un chibrit, nici o lumînare, nici un arzător de gaz nu va arde, deoarece gazele nu se vor ridica

în sus (căci nu există „sus") și nu vor lăsa oxigenul să se apropie. A trebuit să se găsească și mijlocul de a asigura desfășurarea normală a proceselor naturale care au loc în organismul omului, căci și aceste procese „s-au obișnuit" cu forța gravitațională pământească.

Acum ne vom ocupa de observațiile de fizică ce se pot face într-un autobuz sau tramvai care se deplasează accelerat. Particularitatea acestui exemplu, care îl deosebește de cel precedent, este următoarea. În exemplul cu ascensorul, greutatea suplimentară și atracția Pământului erau dirijate pe aceeași dreaptă. Într-un tramvai care frînează sau accelerează, greutatea suplimentară este dirijată în unghi drept față de atracția pământească. Din această cauză, călătorul are o senzație particulară, deși obișnuită. Dacă tramvaiul accelerează, apare o forță suplimentară dirijată în sens contrar sensului mișcării. Să compunem această forță cu forța atracției pământești. Asupra unui om aflat într-un vagon va acționa o forță care formează un unghi obtuz cu direcția mișcării. Cînd ne găsim în vagon, ca de obicei, cu fața în sensul mișcării, simțim

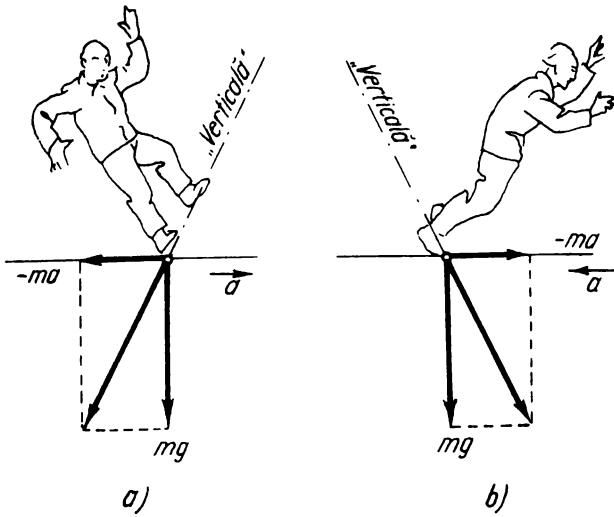


FIG. 20

că „partea de sus" a noastră s-a deplasat. Pentru a nu cădea, căutăm să stăm „vertical", așa se arată în fig. 20, *a*. Dar „verticala" respectivă este oblică. Ea formează un unghi ascuțit cu direcția mișcării. Dacă omul va sta fără să se țină de ceva, va cădea pe spate.

În sfîrșit, mișcarea tramvaiului a devenit uniformă și putem sta nemișcați. Dar se apropie altă stație. Manipulatorul frînează și... „verticala" noastră se înclină. Acum ea este dirijată ca în fig. 20,*b*, formînd un unghi obtuz cu direcția mișcării. Pentru a nu cădea, călătorul se înclină spre spate. Vagonul se oprește, întîrzierea mișcării încetează și „verticala" reia poziția sa anterioară. Corpul trebuie să-și schimbe din nou poziția. Verificați-vă senzațiile. Nu-i așa că în momentul cînd începe frînarea vi se pare că vă împinge cineva din spate (verticala este în spatele dv.)? V-ați „îndreptat", dar acum vagonul s-a oprit și verticala se găsește în fața dv. și simțiți senzația unei împingeri în piept.

Fenomene asemănătoare au loc și în cazul deplasării tramvaiului în curbă. Știm că mișcarea circulară chiar cu viteză constantă ca valoare este accelerată. Accelerația v^2/R va fi cu atît mai mare, cu cît tramvaiul se deplasează mai repede și cu cît raza de curbură R este mai mică. Accelerația acestei mișcări este dirijată după rază și cu sensul spre centru. Această situație este echivalentă cu apariția unei accelerații gravitaționale suplimentare dirijate de la centru spre periferie. Așadar, asupra unui călător din tramvai, în timpul cînd merge în curbă, va acționa o forță suplimentară mv^2/R, care-l aruncă în spre exteriorul curbei. Forța radială mv^2/R se numește forță centrifugă. Aceeași forță, considerată, în adevăr, dintr-un punct de vedere puțin diferit, am întîlnit-o mai înainte, la p. 50.

Efectul forței centrifuge într-un tramvai sau autobuz care parcurge o curbă poate conduce la mici neplăceri. În acest caz, forța mv^2/R este mică. Dacă însă mișcarea în curbă este rapidă, forțele centrifuge pot atinge valori mari, devenind periculoase. Cu valori mari ale lui mv^2/R se întîlnesc aviatorii cînd avionul execută așa-numita buclă a lui Nesterov. Cînd avionul descrie un cerc, asupra aviatorului acționează o forță centrifugă care-l apasă pe scaun. Cu cît este mai mică circumferința buclei, cu atît devine mai mare forța gravitațională suplimentară cu care aviatorul e apăsat pe scaun. Dacă această forță gravitațională este mare, omul se poate „rupe", căci țesuturile organismului viu au o rezistență limitată și nu pot rezista la orice solicitare.

În ce măsură, însă poate fi „îngreunat" un om fără pericol serios pentru viață? Aceasta depinde de timpul cît durează suprasarcina. Dacă ea durează o fracțiune de secundă, omul poate rezista la o greutate de 8—10 ori mai mare, adică o suprasarcină de 7—9 g. Timp de zece secunde, un aviator poate suporta o suprasarcină de 3—5 g. Pe cosmonauți îi interesează suprasarcina pe care omul

o poate suporta zeci de minute și, poate, ore. În astfel de cazuri, suprasarcina trebuie, desigur, să fie mult mai mică.

Să calculăm raza buclei pe care un avion o poate descrie, cu diferite viteze, fără pericol. Să luăm cifra medie de 4 g. Aceasta este valoarea accelerației, adică $\frac{v^2}{R} = 4g$ și $R = \frac{v^2}{4g}$ La viteza de 360 km/h = 100 m/s, raza buclei va fi de 250 m; dacă însă viteza va fi de patru ori mai mare, adică 1 440 km/h (aceste viteze au fost deja depășite de avioanele moderne cu reacție), raza buclei va fi de 16 ori mai mare. Raza minimă a buclei devine egală cu 4 km.

Nu vom trece cu vederea nici mijlocul modest de transport care este bicicleta. Oricine știe cum se înclină un biciclist în curbă. Să presupunem că un biciclist descrie cu viteza v un arc de cerc cu raza R, adică se va deplasa cu accelerația v^2/R dirijată spre centru. Atunci, în afară de forța atracției pămîntești, asupra biciclistului va acționa o forță suplimentară, forță centrifugă, dirijată pe orizontală de la centrul cercului spre periferie. În fig. 21 sînt arătate aceste forțe și rezultanta lor. E clar că biciclistul trebuie să stea „vertical", căci altfel cade. Dar... această verticală nu coincide cu aceea a Pămîntului. Din figură se vede că vectorii mv^2/R și mg sînt catetele unui triunghi dreptunghic. Raportul dintre cateta opusă unghiului α și cateta adiacentă se numește în trigonometrie tangenta unghiului α. În cazul nostru, $\operatorname{tg} \alpha = \frac{v^2}{Rg}$; masa s-a simplificat în virtutea principiului echivalenței. Așadar, unghiul cu care se înclină biciclistul nu depinde de masa lui: atît unul gras cît și unul slab se vor înclina la fel. Formula și triunghiul reprezentat în fig.21 arată cum variază înclinarea în funcție de viteză (înclinarea crește cînd viteza se mărește) și de raza cercului (înclinarea crește cînd raza se micșorează).

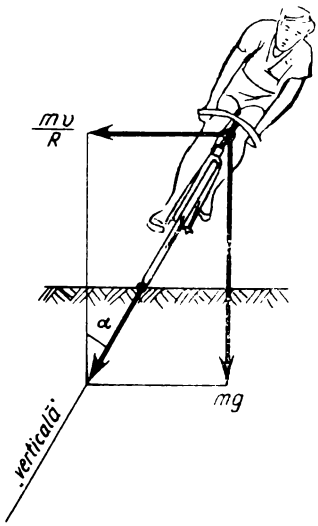


FIG. 21

Am explicat că verticala biciclistului nu coincide cu verticala pămîntească. Ce va simți însă biciclistul? Să rotim puțin fig. 21.

Acum drumul seamănă cu coasta unui munte (fig. 22,*a*) și ne dăm seama că, dacă forța de frecare dintre cauciucurile bicicletei și șosea este insuficientă (de exemplu, în cazul asfaltului umed), bicicleta poate derapa și cotitura cu rază mică se poate termina prin cădere în șanț.

Pentru ca să nu se întîmple acest lucru, la cotiturile cu rază

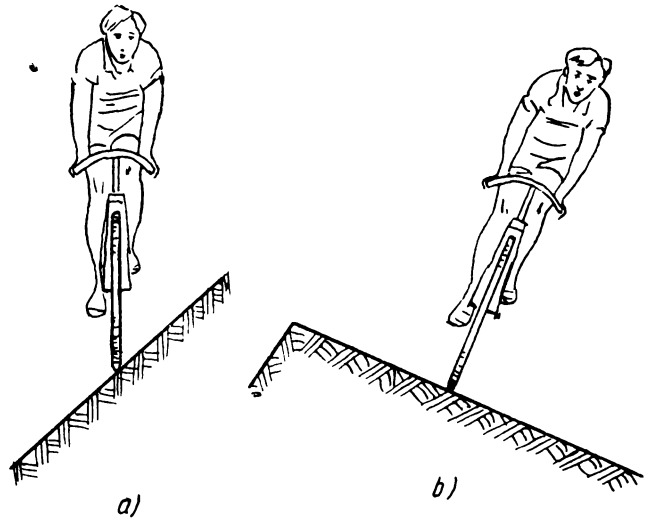


FIG. 22

mică (sau, cum se spune, la viraje), șoseaua se face înclinată, adică orizontală pentru biciclist, ca în fig. 22,*b*. În modul acesta se poate micșora sau chiar suprima tendința de derapaj. Astfel sînt construite curbele pistelor de ciclism și șoselele pe care circulă automobilele.

Rotația

Acum ne vom ocupa de sistemele în rotație. Mișcarea unui astfel de sistem este definită de numărul de rotații pe secundă pe care le execută acest sistem cînd se rotește în jurul unei axe. Trebuie, firește, să se cunoască și direcția axei de rotație.

Pentru a înțelege mai bine particularitățile vieții în sistemele care se rotesc, să examinăm „divanul fermecat" — o atracție bine-

cunoscută (fig. 23). Construcția sa este foarte simplă. Un disc neted cu diametrul de cîțiva metri se rotește cu mare viteză. Cei ce doresc se pot așeza pe el și încerca să se mențină. Chiar oamenii care nu cunosc fizică află repede secretul de a nu fi aruncați de pe disc: trebuie să te așezi în centrul discului, deoarece cu cît te

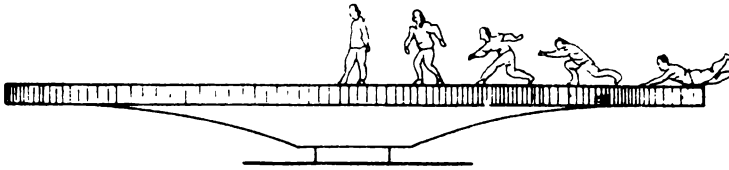


FIG. 23

depărtezi de centru, cu atît e mai greu să te menții pe el.

Un astfel de disc reprezintă un sistem imparțial cu unele însușiri speciale. Orice obiect fixat pe disc se deplasează cu viteza v pe un cerc cu raza R, adică cu accelerația v^2/R. Din punctul de vedere al unui observator inerțial, aceasta înseamnă că există o forță gravitațională suplimentară mv^2/R dirijată după rază, de la centru spre periferie. În orice punct al „divanului fermecat" va acționa această forță radială gravitațională, ea va da naștere la o accelerație radială v^2/R. În punctele situate pe același cerc, valorile acestei accelerații vor fi identice. Dar pe cercuri diferite? Nu vă grăbiți să spuneți că accelerația, conform formulei v^2/R, va fi cu atît mai mare cu cît distanța față de centru este mai mică. Acest lucru este inexact, căci viteza punctelor mai depărtate de centrul discului va fi mai mare. Într-adevăr, dacă se notează cu litera n numărul de rotații executat de disc într-o secundă, drumul parcurs de un punct al discului care se găsește la distanța R de centru într-o secundă, adică viteza acestui punct, va fi $2\pi Rn$.

Viteza punctului este direct proporțională cu distanța de la acesta la centru. Acum se poate transcrie formula astfel:

$$a = 4\pi^2 n^2 R.$$

Întrucît numărul de rotații executate într-o secundă este același pentru toate punctele discului, ajungem la următorul rezultat: accelerația forței „gravitaționale radiale" care acționează asupra discului în rotație crește proporțional cu distanța de la punctul respectiv la centrul discului.

În acest sistem inerțial interesant, forța gravitațională pe diferite cercuri este diferită. Așadar, și direcția „verticalei" pentru corpurile care se găsesc la diferite distanțe de centru va fi diferită,

Bineînțeles că forța de atracție a Pămîntului este aceeași în toate punctele discului. Dar vectorul care caracterizează forța gravitațională radială suplimentară devine mai lung pe măsura creșterii distanței față de centru. Prin urmare, diagonala dreptunghiului deviază din ce în ce mai mult de la verticala Pămîntului.

Dacă exprimăm senzațiile succesive ale unui om care alunecă de pe „divanul fermecat", menținîndu-ne la punctul său de vedere, putem spune că, pe măsură ce se depărtează de centrul discului, el se „înclină" din ce în ce mai mult, devenind imposibil să se mai mențină pe disc.

Dar nu se poate, oare, imagina pentru acest sistem inerțial o construcție asemănătoare cu șoseaua înclinată? Desigur că se poate, însă atunci trebuie să se înlocuiască discul cu o suprafață astfel profilată, încît în fiecare punct al ei forța gravitațională să fie perpendiculară pe suprafață. Forma acestei suprafețe poate fi găsită prin calcul. Ea se numește paraboloid. Această denumire nu este întîmplătoare: paraboloidul are în fiecare secțiune verticală a sa o parabolă, adică curba după care cade un corp aruncat. Paraboloidul ia naștere prin rotația unei parabole în jurul axei sale.

Este foarte ușor să se creeze o astfel de suprafață, dacă se pune în mișcare de rotație rapidă un vas cu apă. Suprafața cilindrului care se rotește este tocmai un paraboloid. Particulele de apă vor înceta să se mai deplaseze numai atunci cînd forța care apasă fiecare particulă pe suprafață va fi perpendiculară pe aceasta.

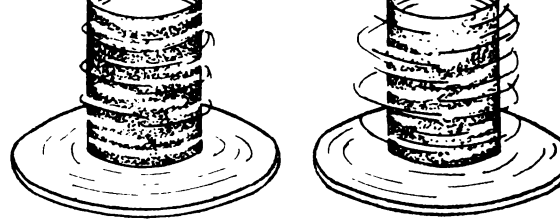


FIG. 24

Fiecărei viteze de rotație îi corespunde un anumit paraboloid (fig. 24).

Dacă se confecționează un paraboloid solid, se poate arăta în mod sugestiv o însușire a sa. O mică bilă plasată în orice punct al unui paraboloid care se rotește cu o anumită viteză rămîne în stare de repaus. Aceasta înseamnă că forța care acționează asupra

ei este perpendiculară pe suprafață. Cu alte cuvinte, suprafața unui paraboloid care se rotește are oarecum însușirile unei suprafețe orizontale. Pe o astfel de suprafață se poate merge ca pe Pămînt și se poate avea în acest timp o senzație de perfectă stabilitate. În timpul mersului însă, direcția verticală se va modifica.

Fenomenele în care intervine forța centrifugă au aplicații largi în tehnică. Pe utilizarea acestor fenomene se bazează, de pildă, construcția centrifugii.

O centrifugă constă dintr-un cilindru care se rotește repede în jurul axei sale. Ce se va întîmpla dacă într-un astfel de cilindru umplut cu apă se aruncă diferite obiecte?

Să cufundăm în apă o bilă de metal; ea se va duce la fund, dar nu pe verticala noastră, ci depărtîndu-se mereu de axa de rotație, și se va opri lîngă peretele vasului. Acum să aruncăm în cilindru o bilă de plută; ea va începe, dimpotrivă, să se miște pe o direcție spre axa de rotație și se va așeza pe această axă.

Dacă cilindrul acestui model de centrifugă are diametrul destul de mare, vom observa că accelerația crește foarte mult pe măsură ce ne depărtăm de centru.

Fenomenele care au loc sînt foarte ușor de explicat. În interiorul centrifugii există o forță gravitațională radială suplimentară. Dacă centrifuga se rotește destul de repede, „fundul" ei este format de pereții cilindrului. Bila de metal „se cufundă" în apă, iar cea de plută „se ridică" la suprafață. Cu cît e mai departe de axa de rotație, cu atît corpul care „cade" în apă devine „mai greu".

La centrifugele perfecționate, viteza de rotație ajunge pînă la 60 000 de rotații pe minut, adică la 10^3 rotații pe secundă. La o distanță de 10 cm de axa de rotație, accelerația forței gravitaționale radiale va fi aproximativ egală cu

$$40 \cdot 10^6 \cdot 0{,}1 = 4 \cdot 10^6 \text{ m/s}^2,$$

adică de 400 000 de ori mai mare decît accelerația pămîntească.

Evident că accelerația gravitațională pămîntească poate fi neglijată la aceste mașini și avem, în adevăr, dreptul să considerăm că „fundul" centrifugii este format de pereții cilindrului.

Din cele precedente se poate deduce care este domeniul de întrebuințare al centrifugii. Dacă dorim să separăm dintr-un amestec particulele grele de cele ușoare, e totdeauna practic să folosim o centrifugă. Toată lumea cunoaște expresia: „un lichid tulbure s-a decantat". Dacă o apă murdară se lasă să stea liniștită un timp suficient de lung, noroiul (de obicei mai greu decît apa) se depune pe fund. Dar procesul decantării poate să dureze luni de zile, pe cînd cu ajutorul unei centrifuge bune se poate epura apa instantaneu.

Centrifugele care se rotesc cu viteze de zeci de mii de rotații pe minut sînt capabile să separe noroiul cel mai fin nu numai din apă, ci și din lichidele vîscoase.

Centrifugele se folosesc în industria chimică la separarea cristalelor din soluțiile din care au luat naștere, la deshidratarea sărurilor și la epurarea lacurilor, iar în industria alimentară, la separarea melasei de zahărul tos.

Centrifugele folosite la separarea particulelor solide sau a incluziunilor lichide dintr-o mare cantitate de lichid se numesc separatoare. Acestea se utilizează mai ales la prelucrarea laptelui. Separatoarele de lapte se rotesc cu o viteză de 2—6 mii de rotații pe minut, iar diametrul cilindrului lor ajunge pînă la 5 m.

În metalurgie se întrebuințează, pe scară largă, turnarea centrifugă. Chiar la viteze de 300—500 de rotații pe minut, metalul lichid care pătrunde în forma în rotație este apăsat cu o forță considerabilă pe pereții exteriori ai acesteia. Așa de toarnă țevile de metal, care sînt mai dense și mai omogene, fără sufluri și fisuri.

Iată și o altă aplicație a forței centrifuge. În fig. 25 este reprezentat un dispozitiv simplu, care servește la reglarea turației pieselor în rotație ale unei mașini. Acest dispozitiv se numește regulator centrifugal. Cînd se mărește viteza de rotație, forța centrifugă crește, iar sferele regulatorului se depărtează de axă. Tijele fixate pe sfere deviază din poziția lor normală; cînd ajunge la o anumită deviere calculată de inginer, pot deschide niște contacte electrice, iar la o mașină cu abur, de exemplu, pot deschide supapele prin care se evacuează aburul de prisos. Atunci viteza de rotație se micșorează, iar tijele își reiau poziția normală.

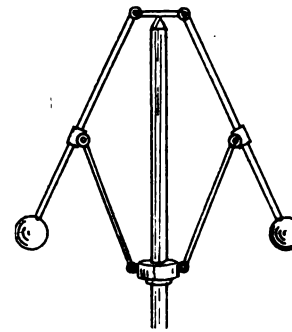


FIG. 25

E interesantă următoarea experiență. Pe axul unui motor electric fixăm un mic cerc de carton. Pornim motorul și apropiem de muchia acestui cerc o bucată de lemn. Această bucată, de grosime destul de mare, va fi tăiată în două tot așa de ușor ca de un ferăstrău de oțel.

Încercarea de a tăia lemnul cu un cartonaș, dacă acesta este manipulat ca un ferăstrău de mînă, poate provoca numai zîmbetul celor de față. De ce însă cartonul care se rotește taie lemnul? Asupra particulelor de carton situate la periferia cercului acționează o forță centrifugă enormă. Forțele laterale care ar putea

deforma planul cartonului sînt infime în comparație cu cele centrifuge. Păstrîndu-și intact planul său, cercul de carton dobîndește posibilitatea de a pătrunde în lemn.

Forța centrifugă creată datorită rotației Pămîntului este cauza diferenței de greutate a unui corp la diferite latitudini, diferență despre care s-a vorbit mai înainte.

La ecuator un corp cîntărește mai puțin decît la pol, din două cauze. Corpurile situate pe suprafața Pămîntului se găsesc la distanțe diferite de axa pămîntească, în funcție de latitudinea locului. Bineînțeles că atunci cînd se trece de la pol la ecuator, această distanță crește. În afară de aceasta, la pol corpul se găsește pe axa de rotație, iar accelerația centrifugă $a = 4\pi^2 m^2 R$ este egală cu zero (deoarece distanța pînă la axa de rotație este $R = 0$). Dimpotrivă, la ecuator această accelerație este maximă. Forța centrifugă micșorează forța de atracție. De aceea, la ecuator presiunea unui corp asupra suportului său (greutatea corpului) este minimă.

Dacă Pămîntul ar avea o formă perfect sferică, o greutate de metal de un kilogram, transportată de la pol la ecuator, ar pierde 3,5 g din greutatea sa. Această cifră se găsește cu ușurință cu ajutorul formulei

$$4\pi^2 n^2 Rm,$$

punînd $n = 1$ rotație pe zi, $R = 6\,300$ km și $m = 1\,000$ g. Nu uitați însă să transformați unitățile de măsură în secunde și centimetri.

De fapt însă, greutatea de metal de 1 kg pierde nu 3,5 g, ci 5,3 g din greutatea sa. Cauza constă în faptul că Pămîntul este o sferă turtită, numită în geometrie elipsoid. Distanța de la pol pînă la centrul Pămîntului este mai mică cu aproximativ a 300-a parte din raza pămîntească la ecuator.

Această turtire a globului pămîntesc se datorește aceleiași forțe centrifuge, care acționează asupra tuturor particulelor Pămîntului. În vremurile de demult, forța centrifugă a „modelat" planeta noastră, dîndu-i forma turtită de azi.

Forța Coriolis

Caracterul particular al sistemelor în rotație nu se limitează la existența diferitelor forțe gravitaționale. Acum vom face cunoștință cu încă un efect interesant, a cărui teorie a fost elaborată în 1835 de francezul Coriolis.

Ne vom pune următoarea întrebare: cum se prezintă mișcarea rectilinie din punctul de vedere al unui laborator în rotație? Planul unui astfel de laborator este reprezentat în fig. 26. Linia care trece prin centru arată traiectoria rectilinie a unui corp oarecare. Vom examina cazul în care drumul corpului trece prin centrul de rotație

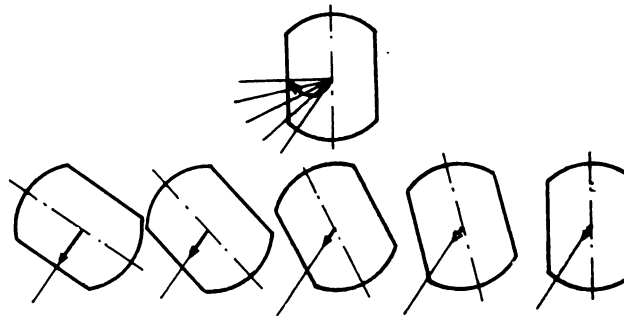


FIG. 26

al laboratorului nostru. Discul pe care se află așezat laboratorul se rotește uniform; în figură sînt arătate cinci poziții ale laboratorului în raport cu traiectoria rectilinie. Așa se prezintă poziția reciprocă a laboratorului și a traiectoriei corpului după una, două, trei etc. secunde. După cum se vede, laboratorul se rotește în sens contrar acelor unui ceasornic, dacă este privit de sus.

Pe linia care reprezintă traiectoria sînt desenate săgeți corespunzătoare ca lungime cu segmentele pe care le parcurge corpul în una, două, trei etc. secunde. În fiecare secundă, corpul parcurge drumuri egale, deoarece este vorba de o mișcare uniformă și rectilinie (din punctul de vedere al unui observator fix).

Să presupunem că corpul în mișcare este o bilă proaspăt vopsită, care se rostogolește pe un disc. Ce urmă va rămîne pe acest disc? Schița de jos din fig. 26 dă răspunsul la această întrebare. Punctele marcate de vîrfurile săgeților au fost transferate de pe cele cinci desene pe un singur desen. Să unim aceste puncte printr-o curbă continuă. Rezultatul acestei construcții nu este surprinzător pentru noi: mișcarea rectilinie și uniformă se prezintă, din punctul de vedere al unui observator care se rotește, ca o mișcare curbilinie. Atrage atenția următoarea regulă: corpul în mișcare se abate în tot timpul spre dreapta față de direcția mișcării sale. Să presupunem că discul se rotește în sensul acelor unui ceasornic și propunem cititorului să repete construcția. Ea va arăta că, în acest caz, corpul în mișcare, din punctul de vedere al unui obser-

vator care se rotește și el, se abate spre stînga față de direcția mișcării sale.

Știm că în sistemele în rotație apare o forță centrifugă. Efectul ei însă nu poate fi cauza curbării traiectoriei, căci ea este dirijată de-a lungul razei. Prin urmare, în sistemele în rotație, pe lîngă forța centrifugă, mai apare încă o forță suplimentară. Ea se numește forța Coriolis.

De ce în exemplele precedente nu ne-am întîlnit cu forța Coriolis și ne-am servit minunat numai de forța centrifugă? Din cauză că pînă acum nu am considerat corpurile din punctul de vedere al unui observator care se rotește, pe cînd forța Coriolis apare numai în acest caz. Asupra corpurilor care se găsesc în stare de repaus într-un sistem în rotație acționează numai forța centrifugă. Masa laboratorului rotativ este înșurubată pe dușumea, așa că asupra ei acționează numai forța centrifugă, dar asupra unei mingi care a căzut de pe masă și se rostogolește pe dușumeaua laboratorului rotitor, în afară de forța centrifugă acționează și forța Coriolis.

De ce mărimi depinde valoarea forței Coriolis? Ea se poate calcula, dar calculele sînt prea complicate pentru a le putea face aici. De aceea, vom descrie numai rezultatul calculelor.

Spre deosebire de forța centrifugă, a cărei valoare depinde de distanța față de axa de rotație, forța Coriolis nu depinde de poziția corpului. Mărimea ei este determinată de viteza corpului, și anume nu numai de mărimea acestei viteze, ci și de direcția ei față de axa de rotație. Dacă corpul se deplasează de-a lungul axei de rotație, forța Coriolis este egală cu zero. Cu cît unghiul dintre vectorul vitezei și axa de rotație este mai mare, cu atît forța Coriolis este și ea mai mare; această forță este maximă cînd corpul se deplasează perpendicular pe axă.

După cum știm, vectorul vitezei se poate descompune întotdeauna în două componente și se pot considera separat cele două mișcări care rezultă și la care corpul ia parte simultan.

Dacă se descompune viteza corpului în componentele $v_{\parallel}$ și $v_{\perp}$, una paralelă și alta perpendiculară pe axa de rotație, prima mișcare nu va fi supusă acțiunii forței Coriolis. Valoarea F_C a forței Coriolis este determinată de componenta $v_{\perp}$ a vitezei. Calculele conduc la formula

$$F_C = 4\pi n v_{\perp} m.$$

Aici m este masa corpului, iar n este numărul de rotații efectuate de sistemul astatic în unitatea de timp. După cum se vede din această formulă, forța Coriolis este cu atît mai mare cu cît sistemul se rotește mai repede și cu cît corpul se deplasează mai repede.

Calculele stabilesc și direcția forței Coriolis. Această forță este întotdeauna perpendiculară pe axa de rotație și pe direcția mișcării. Totodată, după cum s-a mai spus, forța este dirijată spre dreapta față de direcția mișcării în sistemul care se rotește în sens contrar acelor unui ceasornic.

Prin efectul forței Coriolis se explică multe fenomene interesante care au loc pe Pămînt. Pămîntul este o sferă, nu un disc. De aceea, manifestările forțelor Coriolis sînt mai complicate. Aceste forțe se vor repercuta atît asupra mișcării de-a lungul suprafeței Pămîntului, cît și asupra căderii corpurilor pe Pămînt.

Un corp cade, oare, riguros pe verticală? Nu tocmai. Numai la pol corpul cade riguros pe verticală. Acolo direcția mișcării și axa de rotație a Pămîntului coincid și de aceea nu există forță Coriolis. Astfel stau lucrurile la ecuator; aici direcția mișcării formează un unghi drept cu axa Pămîntului. Dacă privim dinspre Polul Nord, rotația Pămîntului ni se prezintă ca avînd sens contrar acelor unui ceasornic. Prin urmare, un corp care cade liber trebuie să devieze spre dreapta față de direcția mișcării, adică spre răsărit. Mărimea devierii spre răsărit, maximă la ecuator, se reduce pînă la zero pe măsură ce ne apropiem de poli.

Să calculăm devierea la ecuator. Întrucît un corp în cădere liberă are o mișcare uniform accelerată, forța Coriolis crește cu cît ne apropiem de Pămînt. De aceea ne vom mărgini la un calcul aproximativ. Dacă corpul cade de la o înălțime, să zicem, de 80 m, căderea durează circa 4 s $\left(\text{conform formulei } t = \sqrt{\frac{2h}{g}}\right)$. Viteza medie în timpul căderii va fi egală cu 20 m/s.

Vom substitui această valoare a vitezei în formula accelerației Coriolis $4\pi nv$. Transformăm valoarea $n = 1$ rotație în 24 h, în rotații pe secundă. În 24 h se cuprind 24 · 3 600 s și deci n este egal cu $\frac{1}{86\,400}$ rot/s; prin urmare, accelerația pe care o produce forța Coriolis este egală cu $\frac{\pi}{1\,080}$ m/s^2. Drumul parcurs cu această accelerație în interval de 4 s este egal cu $\frac{1}{2} \cdot \frac{\pi}{1\,080} \cdot 4^2 = 2{,}3$ cm. Aceasta este chiar valoarea devierii spre răsărit în exemplul nostru. Un calcul precis, care ține seama de neuniformitatea căderii, dă o cifră puțin diferită: 3,1 cm.

Dacă deviația corpului în cădere liberă este maximă la ecuator și egală cu zero la poli, vom observa o situație inversă în cazul devierii sub influența forței Coriolis a unui corp care se deplasează într-un plan orizontal.

O suprafață orizontală la Polul Nord sau Polul Sud nu se deosebește prin nimic de discul cu care am început studiul forței Coriolis. Un corp care se deplasează pe o astfel de suprafață va fi deviat de forța Coriolis spre dreapta față de direcția mișcării la Polul Nord și spre stînga față de această direcție la Polul Sud. Cititorul, servindu-se de aceeași formulă a accelerației Coriolis, poate calcula fără dificultate că un glonț pornit dintr-o pușcă cu viteza inițială de 500 m/s deviază de la țintă, în plan orizontal, într-o secundă (adică pe o distanță de 500 m) cu un segment egal cu 3,5 m.

De ce însă deviația în plan orizontal la ecuator trebuie să fie egală cu zero? Se înțelege fără demonstrații riguroase că așa trebuie să fie, pentru că, la Polul Nord, corpul deviază spre dreapta, iar la Polul Sud, spre stînga, ceea ce înseamnă că la mijlocul distanței dintre poli, adică la ecuator, deviația va fi egală cu zero.

Ne amintim experiența cu pendulul lui Foucault. Un pendul care oscilează la pol își păstrează planul său de oscilație. Pămîntul, rotindu-se, fuge de sub pendul. Aceasta este explicația pe care o dă experienței lui Foucault un observator sideral, pe cînd un observator care se rotește împreună cu globul pămîntesc explică această experiență prin apariția forței Coriolis. În adevăr, forța Coriolis este dirijată perpendicular pe axa Pămîntului și perpendicular pe direcția mișcării pendulului; cu alte cuvinte, forța este perpendiculară pe planul de oscilație al pendulului și va roti acest plan neîncetat. Se poate face în așa fel, încît capătul liber al pendulului să deseneze traiectoria mișcării. Această traiectorie este „rozeta" reprezentată în fig. 27. În această figură, în timp de o perioadă și jumătate de oscilație a pendulului, „Pămîntul" se rotește cu un sfert de rotație, pendulul lui Foucault se rotește mult mai încet. La pol, planul de oscilație al pendulului se rotește într-un minut cu un sfert de grad. La Polul Nord, planul se va roti la dreapta față de direcția mișcării pendulului, iar la Polul Sud, la stînga.

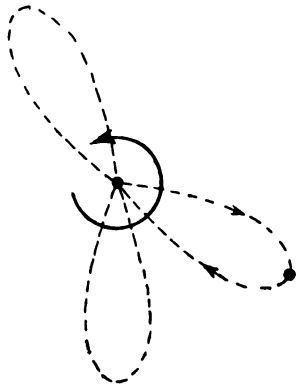


FIG. 27

La latitudinile Europei centrale, efectul Coriolis va fi ceva mai mic decît la ecuator. Glonțul din exemplul pe care l-am dat ceva mai înainte va devia nu cu 3,5 cm, ci cu 2,5 cm. Pendulul lui Foucault se va roti într-un minut aproximativ cu 1/6 dintr-un grad.

Artileriștii trebuie, oare, să țină seama de forța Coriolis? Tunul „Bertha", cu care germanii au bombardat Parisul în timpul primului război mondial, se găsea la o distanță de 110 km de țintă. Abaterea Coriolis atinge în acest caz 1 600 m, ceea ce nu este o valoarea neglijabilă.

Dacă se trimite un proiectil la mare distanță, fără să se țină

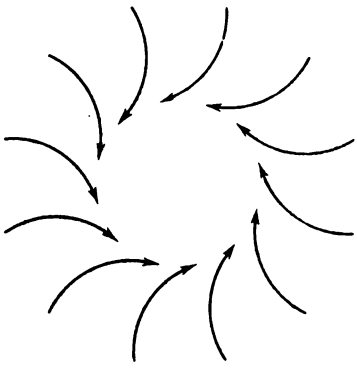


FIG. 28

FIG. 29

seamă de forța Coriolis, el deviază considerabil de la direcția fixată. Acest efect este mare, nu fiindcă este mare forța (la un proiectil de 10 t, avînd viteza de 1 000 km/h, forța Coriolis va fi de circa 25 kgf), ci pentru că forța acționează continuu un timp îndelungat.

Desigur, influența vîntului asupra unui proiectil neghidat poate fi nu mai puțin considerabilă. Corecția direcției pe care o face pilotul depinde de acțiunea vîntului, de efectul Coriolis și de imperfecțiunea avionului sau a avionului-proiectil.

Ce specialiști, în afară de aviatori și de artileriști, trebuie să țină seamă de efectul Coriolis? Oricît ar părea de curios acest lucru, printre ei se numără și feroviarii. La o cale ferată, sub influența forței Coriolis, o șină se uzează pe partea interioară mult mai mult decît cealaltă. Noi știm care anume: în emisfera nordică, va fi șina din dreapta (în sensul mișcării), iar în emisfera sudică, șina din stînga. În această privință n-au nici o grijă numai feroviarii din țările ecuatoriale.

Roaderea malurilor din dreapta ale rîurilor în emisfera nordică se explică la fel ca și uzura șinelor. Devierile albiei se datoresc în mare parte influenței forței Coriolis. S-a constatat că rîurile din emisfera nordică ocolesc obstacolele pe la dreapta.

Se știe că curenții de aer năvălesc în regiunile de joasă presiune. Dar de ce un astfel de vînt se numește ciclon? În adevăr rădăcina acestui cuvînt arată că e vorba de o mișcare circulară (ciclică).

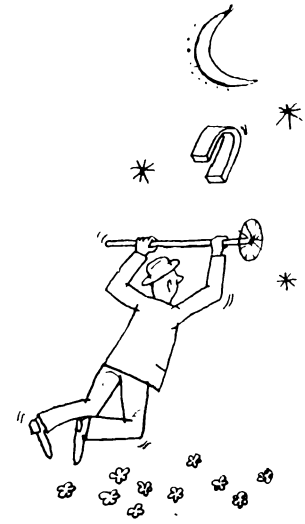
Chiar așa și este mișcarea: în regiunea de joasă presiune ia naștere o mișcare circulară a maselor de aer (fig. 28). Cauza este efectul forței Coriolis. În emisfera nordică, toți curenții de aer care năvălesc spre un punct de joasă presiune deviază spre dreapta față de direcția mișcării lor. Din fig. 29 se vede că rezultatul este o deviere a vînturilor alizee din ambele emisfere spre apus.

De ce însă această forță așa de mică joacă un rol atît de mare în mișcarea maselor de aer?

Aceasta se explică prin valoarea neînsemnată a forțelor de frecare. Aerul este foarte mobil și o forță mică, dar care acționează continuu, are consecințe dintre cele mai importante.

IV

Legile conservării



Reculul

Se știe că atunci cînd se trage cu tunul, acesta sare brusc înapoi. Cînd se trage cu pușca, se produce un recul în umăr. Dar chiar fără a recurge la o armă de foc, se poate face cunoștință cu fenomenul de recul. Turnați apă într-o eprubetă, astupați-o cu un dop și atîrnați-o cu două fire de ață în poziție orizontală (fig. 30). Apoi apropiați de sticlă o flacără; apa va începe să fiarbă și, după două minute, dopul va sări cu zgomot într-o parte, iar eprubeta va devia în partea opusă.

Forța care a aruncat dopul din eprubetă este presiunea aburului, iar forța care a deviat eprubeta este tot presiunea aburului. Ambele mișcări au luat naștere sub influența aceleiași forțe. Același lucru se petrece și în cazul tragerii cu arma, cu diferența că atunci nu acționează aburul, ci gazele degajate de praful de pușcă.

Fenomenul reculului ascultă obligatoriu de legea acțiunii și reacțiunii. Dacă aburul acționează asupra dopului, atunci și dopul acționează asupra aburului în sens contrar, iar aburul transmite această reacțiune eprubetei.

Poate însă că cititorul va ridica o obiecție: este posibil, oare, ca aceeași forță să aibă consecințe atît de diferite? Pușca sare doar puțin înapoi, pe cînd glonțul se duce la mare depărtare. Desigur că niște forțe identice pot avea consecințe diferite, căci accelerația pe care o capătă un corp (aceasta este tocmai consecința acțiunii forței) este invers proporțională cu masa acelui corp. Accelerația unuia din corpuri (obuz, glonț, dop) trebuie scrisă sub forma

$a_1 = \frac{F}{m_1}$, iar accelerația corpului care suferă reculul (tun, pușcă, eprubetă) va fi $a_2 = \frac{F}{m_2}$. Întrucît forța este una și aceeași, ajungem la următoarea concluzie importantă: accelerațiile rezultate în

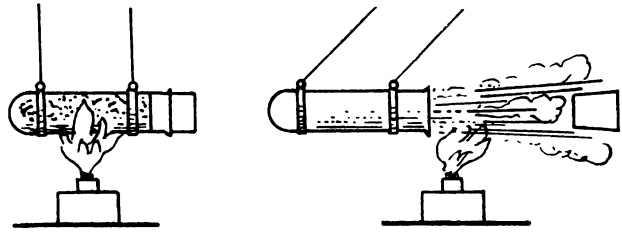


FIG. 30

cazul interacțiunii a două corpuri care iau parte la o „tragere" sînt invers proporționale cu masele, adică

$$\frac{a_1}{a_2} = \frac{m_2}{m_1}.$$

Aceasta înseamnă că accelerația pe care o capătă tunul în timpul reculului este de atîtea ori mai mică decît accelerația obuzului de cîte ori masa tunului este mai mare decît masa obuzului.

Accelerația glonțului, precum și cea a puștii în timpul reculului, durează atîta timp cît glonțul se deplasează în țeava puștii. Să notăm acest timp cu litera t. După acest interval de timp, mișcarea accelerată devine uniformă. Pentru simplificare, vom considera accelerația constantă. Atunci, viteza cu care glonțul iese din țeava puștii va fi $v_1 = a_1 t$, iar viteza reculului va fi $v_2 = a_2 t$. Întrucît timpul cît durează accelerația este unul și același, vom avea $\frac{v_1}{v_2} = \frac{a_1}{a_2}$ și, prin urmare, $\frac{v_1}{v_2} = \frac{m_2}{m_1}$.

Vitezele cu care se depărtează unul de altul corpurile după ce au interacționat vor fi invers proporționale cu masele acestor corpuri.

Dacă avem în vedere caracterul vectorial al vitezei, ultima relație se poate transcrie astfel: $m_1\vec{v}_1 = -m_2\vec{v}_2$; semnul minus arată că vitezele $\vec{v}_1$ și $\vec{v}_2$ sînt îndreptate în sensuri opuse.

În sfîrșit, mai transcriem egalitatea o dată, trecînd produsul maselor cu vitezele în același membru al egalității:

$$m_1v_1 + m_2v_2 = 0.$$

Legea conservării impulsului

Produsul masei unui corp cu viteza sa se numește impulsul corpului (altă denumire este cantitatea de mișcare). Întrucît viteza este un vector, și impulsul este tot o mărime vectorială. Bineînțeles că sensul impulsului coincide cu sensul vitezei corpului.

Cu ajutorul acestei noi noțiuni, legea lui Newton $F = ma$ se poate exprima în alt mod. Întrucît $a = \frac{v_2 - v_1}{t}$, atunci $F = \frac{mv_2 - mv_1}{t}$, sau $Ft = mv_2 - mv_1$. Produsul dintre forță și timpul cît acționează ea este egal cu variația impulsului.

Să ne întoarcem la fenomenul reculului.

Concluzia la care am ajuns examinînd reculul tunului se poate formula acum mai scurt astfel: suma impulsurilor tunului și obuzului, după ce s-a tras focul, rămîne egală cu zero. Evident că ea era nulă și înainte de tragere, cînd tunul și obuzul se găseau în stare de repaus.

Vitezele care figurează în ecuația $m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 = 0$ sînt vitezele în momentul imediat următor tragerii focului. În timpul mișcării ulterioare a obuzului și a tunului vor începe să acționeze asupra lor forțele gravitaționale, rezistența aerului, iar în plus asupra tunului, și forța frecării de Pămînt. Dacă tragerea ar avea loc într-un spațiu fără aer cu un tun suspendat în vid, mișcarea cu vitezele v_1 și v_2 ar continua la infinit. Obuzul s-ar deplasa într-un sens, iar tunul în sens contrar.

În artilerie se folosesc pe scară largă tunuri instalate pe vagoane-platformă și trăgînd din mers. Cum trebuie să se modifice ecuația de mai înainte pentru ca să fie aplicabilă la tirul cu un astfel de tun? Putem scrie

$$m_1\vec{u}_1 + m_2\vec{u}_2 = 0,$$

în care $\vec{u}_1$ și $\vec{u}_2$ sînt vitezele obuzului și respectiv tunului în raport cu vagonul-platformă în mișcare. Dacă viteza vagonului este $\vec{V}$, vitezele tunului și obuzului în raport cu un observator în repaus vor fi $\vec{v}_1 = \vec{u}_1 + \vec{V}$ și $\vec{v}_2 = \vec{u}_2 + \vec{V}$.

Înlocuind cu valorile lui u_1 și u_2 în ultima ecuație, vom obține

$$(m_1 + m_2)\vec{V} = m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2.$$

În membrul al doilea al egalității se găsește suma impulsurilor obuzului și respectiv tunului după tragere. Dar în membrul întîi?

Înainte de tragere, tunul și obuzul, cu masa totală $m_1 + m_2$, se deplasează împreună cu viteza $\vec{V}$. Așadar, în membrul întîi al egalității avem impulsul total al obuzului și al tunului, dar înainte de tragere.

Am demonstrat o lege foarte importantă a naturii, care se numește legea conservării impulsului. Noi am demonstrat-o pentru două corpuri, dar se poate ușor arăta că același rezultat se obține și pentru orice număr de corpuri. Care este conținutul acestei legi? Legea conservării impulsului spune că suma impulsurilor mai multor corpuri care se găsesc în interacțiune nu variază în urma acestei interacțiuni.

Evident că legea conservării impulsului va fi valabilă numai atunci cînd asupra grupului de corpuri considerat nu acționează forța dinafară. Un astfel de grup se numește în fizică un sistem închis.

Pușca și glonțul în timpul tragerii se comportă ca un sistem închis format din două corpuri, cu toate că suferă acțiunea forței de atracție a Pămîntului. Greutatea glonțului este mică în comparație cu forța gazelor degajate de praful de pușcă și fenomenul reculului are loc după aceleași legi, indiferent dacă tragerea se face pe Pămînt sau într-o rachetă care zboară în spațiul interplanetar.

Legea conservării impulsului permite să se rezolve cu ușurință problema care se referă la ciocnirea corpurilor. Dacă încercăm să lovim cu o bilă de argilă altă bilă din același material, ele se vor lipi și vor continua mișcarea împreună; dacă se trage cu pușca într-o bilă de lemn, ea va începe să se rostogolească împreună cu glonțul care a pătruns în ea; un vagonet care stă pe loc va începe să se deplaseze, dacă un om sare cu avînt în el. Toate aceste exemple sînt foarte asemănătoare din punctul de vedere al fizicii.

Regula care leagă vitezele corpurilor, în cazul ciocnirilor de acest tip, se obține imediat din legea conservării impulsului.

Impulsurile corpurilor înainte de întîlnirea lor erau $m_1\vec{v}_1$ și $m_2\vec{v}_2$, dar după ciocnire, corpurile se unesc, masa lor totală fiind egală cu $m_1 + m_2$. Notînd cu $\vec{V}$ viteza corpurilor împreunate, obținem

$$m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 = (m_1 + m_2)\vec{V},$$

sau

$$\vec{V} = \frac{m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2}{m_1 + m_2}.$$

Amintim caracterul vectorial al legii conservării impulsului. Impulsurile $m\vec{v}$ care apar la numărătorul formulei trebuie să se adune ca vectori.

Ciocnirea cu „împreunare", care are loc cînd corpurile se întîlnesc sub un unghi oarecare, este reprezentată în fig. 31. Pentru a găsi valoarea vitezei rezultante, trebuie ca lungimea diagonalei paralelogramului construit pe vectorii impulsurilor corpurilor care se întîlnesc să se împartă la suma maselor respectivelor corpuri.

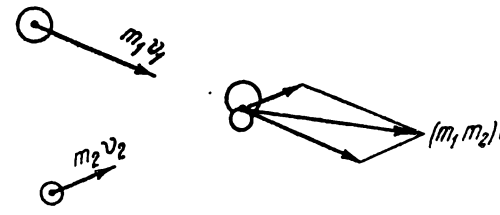


FIG. 31

Mișcarea reactivă

Omul se mișcă proptindu-se cu picioarele pe pămînt; barca înaintează din cauză că vîslașii se proptesc cu vîslele de apă; motonava, de asemenea, se propteşte de apă, dar nu cu vîslele, ci cu elicele. De asemenea, se propteşte de pămînt şi trenul care merge pe şine, şi automobilul; amintiţi-vă ce greu porneşte maşina din loc cînd este polei.

Aşadar, proptirea de un reazem fix este un fel de condiţie necesară a mişcării; chiar şi avionul se mişcă proptindu-se cu elicea de aer.

Aşa să fie, oare? Nu există vreun mijloc ingenios de a avansa fără a te propti de ceva? Dacă patinaţi, vă puteţi convinge, cu uşurinţă, din experienţă proprie, că o astfel de mişcare este perfect posibilă. Luaţi în mîini un par greu şi intraţi pe gheaţa unui lac. Aruncaţi parul în faţă; ce se va întîmpla? Veţi aluneca cu patinele înapoi, deşi nici nu v-aţi gîndit să vă proptiţi cu picioarele de gheaţă.

Fenomenul reculului, pe care l-am studiat mai înainte, ne dă cheia executării mişcării fără punct de reazem, adică a mişcării fără proptire. Reculul dă posibilitatea să se accelereze mişcarea şi în spaţiul lipsit de aer, unde nu este esenţial să existe un reazem de care să te propteşti.

Reculul provocat de un jet de abur expulzat dintr-un vas (reacţia jetului) a fost folosit încă din antichitate pentru a face o jucărie interesantă. În fig. 32 este reprezentată o turbină antică cu abur,

inventată în secolul al II-lea înaintea erei noastre. Cazanul sferic se reazemă pe un ax vertical. Țîșnind din cazan prin niște țevi cotite, aburul împingea aceste țevi în sens contrar, iar sfera se învîrtea.

În zilele noastre, folosirea mișcării reactive a trecut mult dincolo de granițele construirii jucăriilor și adunării de observații interesante. Secolul al XX-lea se numește uneori secolul energiei atomice, dar s-ar putea numi cu tot atîta temei secolul mișcării reactive, deoarece utilizarea motoarelor puternice cu reacție nu reprezintă numai o revoluție în construcția avioanelor, ci și începutul comunicațiilor omului cu universul.

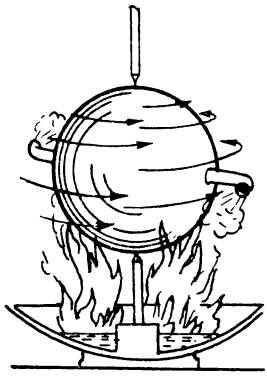


FIG. 32

Principiul mișcării reactive a permis să se construiască avioane care zboară cu viteze de cîteva mii de kilometri pe oră, proiectile zburătoare care se ridică la înălțimi de sute de kilometri deasupra Pămîntului și rachete cosmice care efectuează călătorii interplanetare.

Motorul cu reacție este o mașină din care se expulzează cu mare putere gazele formate prin arderea combustibilului. Racheta se deplasează în sens opus fluxului de gaze. Cu ce este egală forța de propulsie care trimite o rachetă în spațiu? Știm că forța este egală cu variația impulsului în unitatea de timp. Conform legii conservării, impulsul rachetei variază în funcție de impulsul mv al gazelor expulzate.

Această lege a naturii ne permite să calculăm, de exemplu, legătura dintre forța de propulsie reactivă și consumul de combustibil necesar. În acest caz e necesar să se ia ipotetic valoarea vitezei cu care se scurg produsele arderii. Să luăm, de exemplu, următoarele cifre: gazele sînt evacuate cu o viteză de 2 000 m/s în cantitate de 10 t/s; atunci, forța de propulsie ar fi de aproximativ $2 \cdot 10^{12}$ dyn, adică rotunjit de 2 000 t.

Să determinăm variația vitezei unei rachete care se deplasează în spațiul interplanetar.

Impulsul unei mase de gaz ΔM expulzată cu viteza u este egal cu $u\Delta M$. Impulsul rachetei de masă M crește în acest timp cu

cantitatea $M \cdot v$. Conform legii conservării, aceste două cantități sînt egale una cu alta:

$$u \cdot \Delta M = M \cdot \Delta v, \text{ adică } \Delta v = u \frac{\Delta M}{M}.$$

Dacă însă vrem să calculăm viteza rachetei cînd se expulzează mase comparabile cu masa rachetei, formula de mai înainte nu este valabilă, deoarece am considerat că masa rachetei este invariabilă. Rămîne însă valabil următorul rezultat important: la variații relativ egale ale masei, viteza crește cu aceeași cantitate. Calculul cu formula exactă arată că, dacă masa rachetei se reduce la jumătate, viteza ei atinge $0{,}7u$.

Pentru a ridica viteza rachetei la $3u$, trebuie să se ardă o masă de substanță $m = \frac{19}{20}M$. Aceasta înseamnă că numai 1/20 din masa rachetei se poate conserva dacă vrem să ridicăm viteza la $3u$, adică la 6—8 km/s.

Pentru a obține o viteză egală cu $7u$, masa rachetei în timpul accelerării trebuie să se micșoreze de 1 000 de ori.

Aceste calcule ne previn să nu urmărim mărirea masei de combustibil pe care o poate cuprinde racheta. Cu cît vom lua mai mult combustibil, cu atît va trebui să se ardă mai mult. La o viteză dată de scurgere a gazelor, este foarte greu să se realizeze o mărire a vitezei rachetei.

Principalul în atingerea vitezelor mari ale rachetelor este mărirea vitezei de scurgere a gazelor. În această privință, trebuie să joace un rol esențial folosirea motoarelor de rachetă care să funcționeze cu noul combustibil, combustibilul nuclear.

La aceeași viteză de scurgere a gazelor se obține un cîștig de viteză, pentru aceeași masă de carburant, dacă se utilizează rachete cu mai multe trepte. La o rachetă cu o singură treaptă, masa combustibilului scade, dar rezervoarele goale continuă să se deplaseze împreună cu racheta. Pentru accelerarea masei rezervoarelor de combustibil inutile, este nevoie de o energie suplimentară. De aceea este rațional ca, pe măsură ce se consumă combustibilul, să se arunce rezervoarele de combustibil. La rachetele moderne cu mai multe trepte, se aruncă nu numai rezervoarele și conductele, ci și motoarele treptelor care s-au consumat.

Bineînțeles că cel mai bun lucru ar fi să se arunce masele inutile ale rachetei în mod continuu. Deocamdată nu există un astfel de sistem. Greutatea la lansare a unei rachete cu trei trepte, avînd

același „plafon" ca și o rachetă cu o singură treaptă, poate fi făcută de șase ori mai mică. O rachetă „continuă" ar fi mai avantajoasă în acest sens cu încă 15 %.

Mișcarea sub efectul forței gravitaționale

Vom lăsa să ruleze cîte un mic cărucior pe două plane înclinate foarte netede. Luăm una din scînduri mult mai scurtă decît cealaltă și le vom pune pe același reazem. În acest caz, un plan înclinat va fi cu pantă mare, iar celălalt cu pantă mică. Partea de sus a ambelor plane — punctele de plecare ale căruciorului — se vor găsi la aceeași înălțime. Ce credeți, care din cărucioare va căpăta o viteză mai mare cînd coboară pe un plan înclinat? Mulți vor spune că acela care coboară pe planul cu pantă mai mare.

Experiența arată că aceștia greșesc, cărucioarele căpătînd aceeași viteză. În timp ce un corp se deplasează pe un plan înclinat, el se găsește sub influența unei forțe constante, și anume

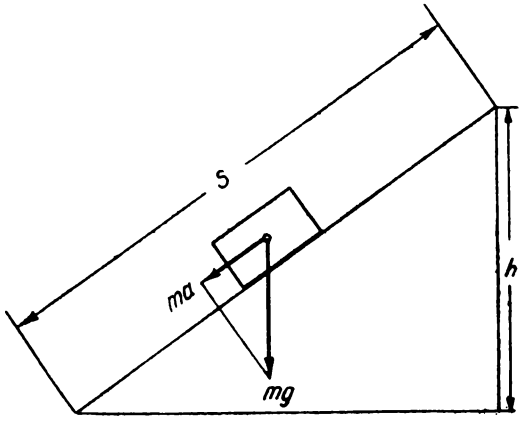


FIG. 33

(fig. 33) sub influența acelei componente a forței gravitaționale care este dirijată pe direcția mișcării. Viteza v pe care o capătă corpul care se mișcă cu accelerația a pe distanța s este egală, după cum știm, cu $v = \sqrt{2as}$.

De unde rezultă că această mărime nu depinde de unghiul de înclinare al planului? În fig. 33 vedem două triunghiuri. Unul din ele reprezintă planul înclinat. Cateta cea mică a planului înclinat,

notată cu litera h, este înălțimea de la care începe mișcarea, iar ipotenuza s este drumul parcurs de corp în mișcare accelerată. Triunghiul cel mic cu cateta ma și cu ipotenuza mg este asemenea cu cel mare, deoarece ele sînt dreptunghice, iar unghiurile lor sînt egale cu unghiuri cu laturile omologe perpendiculare una pe alta. Așadar, raportul catetelor trebuie să fie egal cu raportul ipotenuzelor, adică

$$\frac{h}{ma} = \frac{s}{mg} \text{ sau } as = gh.$$

Am demonstrat că produsul as, și deci și viteza finală a unui corp care se rostogolește pe un plan înclinat, nu depinde de unghiul de înclinare, ci depinde numai de înălțimea de la care a început mișcarea în jos. Viteza are aceeași valoare $v = \sqrt{2gh}$ pentru toate planele înclinate, cu singura condiție ca mișcarea să înceapă de la aceeași înălțime h. Această viteză este egală cu viteza căderii libere de la înălțimea h.

Să măsurăm viteza corpului în două puncte ale planului înclinat — la înălțimile h_1 și h_2. Viteza corpului în momentul cînd trece prin primul punct o vom nota cu v_1, iar viteza în momentul trecerii prin al doilea punct, cu v_2.

Dacă înălțimea inițială de la care a început mișcarea este h, pătratul vitezei corpului în primul punct va fi $v_1^2 = 2g(h - h_1)$, iar în al doilea punct $v_2^2 = 2g(h - h_2)$. Scăzînd prima viteză din a doua vom găsi care este legătura dintre vitezele corpului la începutul și la sfîrșitul unei porțiuni oarecare a planului înclinat, pe de o parte, și înălțimile acestor puncte, pe de alta:

$$v_2^2 - v_1^2 = 2g(h_1 - h_2).$$

Diferența dintre pătratele vitezelor depinde numai de diferența înălțimii. Observăm că ecuația obținută este valabilă atît pentru mișcarea în sus, cît și pentru mișcarea în jos. Dacă prima înălțime este mai mică decît cea de-a doua (ridicare), a doua viteză va fi mai mică decît prima.

Această formulă se poate transcrie în modul următor:

$$\frac{v_1^2}{2} + gh_1 = \frac{v_2^2}{2} + gh_2$$

Prin această scriere a formulei vrem să subliniem că suma dintre jumătatea pătratului vitezei și înălțimea înmulțită cu g este aceeași pentru orice punct al planului înclinat. Se poate spune că mărimea $\frac{v^2}{2} + gh$ se menține constantă în tot timpul mișcării.

Cel mai remarcabil în legea găsită este că ea își păstrează valabilitatea pentru mișcarea fără frecare pe orice plan înclinat și, în general, pe orice drum constînd din ridicări și coborîri succesive cu diferite pante. Aceasta rezultă din faptul că orice drum se poate descompune în porțiuni rectilinii. Cu cît aceste porțiuni sînt mai mici, cu atît linia frîntă se va apropia mai mult de o curbă. Fiecare segment de dreaptă în care este descompus drumul curbiliniu poate fi considerat ca o parte dintr-un plan înclinat și i se poate aplica legea găsită.

Așadar, în orice punct al traiectorici, suma $\frac{v^2}{2} + gh$ este identică. De aceea, variația pătratului vitezei nu depinde de forma și lungimea drumului pe care s-a deplasat corpul, ci este determinată numai de diferența dintre înălțimile punctelor în care începe și se termină mișcarea.

Se poate arăta cititorului că concluzia noastră nu coincide cu experiența de toate zilele: pe un drum lung și cu pantă foarte mică, un corp nu își mărește viteza, ci în cele din urmă se oprește. Aceasta este realitatea, dar în raționamentele noastre n-am ținut seamă de forța de frecare. Formula scrisă mai înainte este adevărată pentru mișcarea în cîmpul gravitațional al Pămîntului numai sub influența forței gravitaționale. Dacă forțele de frecare sînt mici, legea dedusă se va verifica destul de bine. Pe colinele acoperite cu gheață netedă, săniile cu tălpici de metal alunecă cu o frecare foarte mică. Se pot amenaja piste de gheață lungi, care să înceapă cu o coborîre abruptă, de-a lungul căreia se capătă o viteză mare și care apoi să se continue cu diverse ondulații în sus și în jos. Sfîrșitul călătoriei pe astfel de coline (cînd sania se va opri de la sine), dacă frecarea ar lipsi complet, ar avea loc la o înălțime egală cu cea inițială. Deoarece însă frecarea nu poate fi evitată, punctul din care a început mișcarea saniei va fi mai sus decît punctul unde aceasta se va opri.

Legea conform căreia viteza finală nu depinde de forma drumului, în cazul mișcării sub influența forței gravitaționale, poate fi aplicată pentru rezolvarea multor probleme interesante.

La circ se prezintă de multe ori, ca o atracție senzațională, „cercul morții" vertical. Un biciclist sau un cărucior cu un acrobat se urcă pe un ring înalt, de unde coboară cu o mișcare accelerată, după care urmează un urcuș. Acum acrobatul se găsește în poziția cu capul în jos, apoi coboară din nou și astfel s-a închis „cercul morții". Să examinăm problema pe care o are de rezolvat inginerul circului. La ce înălțime trebuie să se facă ringul de pe care începe coborîrea, pentru ca acrobatul să nu se prăbușească în momentul

cînd ajunge în punctul cel mai înalt al cercului morții? Noi știm care este condiția: forța centrifugă care apasă pe acrobat pe pistă trebuie să fie echilibrată de forța gravitațională, dirijată în sens contrar. Așadar, $mg \leqslant \frac{mv^2}{r}$, în care r este raza cercului morții, iar v este viteza în punctul cel mai înalt al cercului. Pentru a se atinge această viteză, trebuie să se înceapă mișcarea dintr-un punct situat mai sus, la o înălțime mai mare decît cea a punctului superior al cercului cu o valoare oarecare h. Viteza inițială a acrobatului este egală cu zero și, de aceea, în punctul superior al cercului $v^2 = 2gh$. Pe de altă parte, însă, $v^2 \geqslant gr$. Prin urmare, între înălțimea h și raza cercului există relația $h \geqslant \frac{r}{2}$. Deci ringul trebuie să se afle la o înălțime care să depășească punctul superior al cercului cu o valoare cel puțin egală cu jumătate din raza cercului. Ținînd seama de forța inevitabilă de frecare, trebuie, firește, să se ia o oarecare rezervă de înălțime.

Iată însă o problemă. Să luăm o cupolă sferică, foarte netedă, pentru ca frecarea să fie minimă. În creștetul cupolei să punem un mic obiect și, printr-o ușoară împingere, să-i dăm posibilitatea să alunece pe cupolă. Mai curînd sau mai tîrziu, corpul care alunecă se va desprinde de cupolă și va începe să cadă. Putem rezolva cu ușurință problema stabilirii momentului cînd corpul se va desprinde de suprafața cupolei: în momentul desprinderii, forța centri-

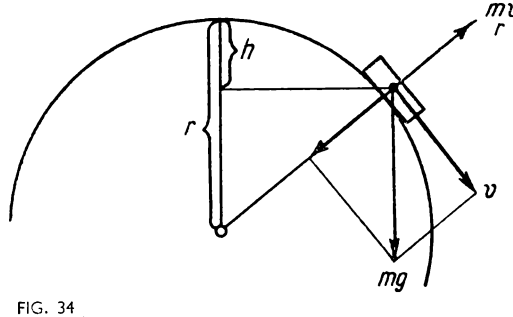


FIG. 34

fugă trebuie să fie egală cu componenta greutății pe direcția razei (în acel moment, corpul nu mai apasă pe cupolă și acesta este chiar momentul desprinderii). În fig. 34 se văd două triunghiuri asemenea și este reprezentată situația din momentul desprinderii. Să scriem raportul dintre catetă și ipotenuză pentru triunghiul

forțelor și să-l egalăm cu raportul corespunzător al laturilor celuilalt triunghi:

$$\frac{\frac{mv^2}{r}}{mg} = \frac{r-h}{r}.$$

Aici r este raza cupolei sferice, iar h este diferența de înălțime dintre începutul și sfîrșitul alunecării corpului pe cupolă. Acum aplicăm legea independenței vitezei de forma drumului. Întrucît viteza inițială a corpului este presupusă egală cu zero, avem $v^2 = gh$. Substituind această valoare în proporția scrisă mai sus și făcînd transformările aritmetice cuvenite, găsim $h = \frac{r}{3}$. Așadar, corpul se va desprinde de cupolă la o înălțime care se găsește cu 1/3 de rază mai jos de creștetul cupolei.

Legea conservării energiei mecanice

Ne-am convins, pe baza exemplelor examinate, ce util este să se cunoască o mărime care nu-și schimbă valoarea numerică (care se conservă) în timpul mișcării.

Deocamdată cunoaștem o astfel de mărime numai pentru un singur corp. Dar dacă în cîmpul gravitațional se mișcă mai multe corpuri legate între ele? Evident, nu se poate considera că pentru fiecare dintre ele rămîne invariabilă expresia $\frac{v^2}{2} + gh$, deoarece fiecare dintre corpuri se găsește nu numai sub influența forței gravitaționale, ci și a corpurilor vecine. Se menține, poate, invariabilă suma unor asemenea expresii luată pentru grupul de corpuri considerate?

Vom arăta că această ipoteză este falsă. O mărime care se menține invariabilă în cazul mișcării a mai multor corpuri există, dar ea nu este egală cu suma

$$\left(\frac{v^2}{2} + gh\right)_{corp\ 1} + \left(\frac{v^2}{2} + gh\right)_{corp\ 2} + \cdots,$$

ci este egală cu suma acestor expresii înmulțite cu masele corpurilor respective; cu alte cuvinte, se menține suma

$$m_1\left(\frac{v^2}{2} + gh\right)_1 + m_2\left(\frac{v^2}{2} + gh\right)_2 + \cdots$$

Pentru a demonstra această lege foarte importantă a mecanicii, ne vom servi de următorul exemplu.

Peste un scripete trece o frînghie, de capetele căreia sînt legate două greutăţi, una mai mare de masă M şi una mai mică de masă m. Greutatea cea mare o trage pe cea mică şi acest grup de două corpuri se mişcă cu o viteză crescîndă.

Forţa motoare este diferenţa dintre greutăţile acestor corpuri, adică $Mg - mg$. Întrucît la mişcarea accelerată participă ambele corpuri, legea lui Newton se va scrie, în acest caz, astfel:

$$(M - m)\, g = (M + m)\, a.$$

Să considerăm două momente ale mişcării şi să arătăm că suma expresiilor $\frac{v^2}{2} + gh$ înmulţite cu masele respective rămîne în adevăr constantă. Aşadar, trebuie să se demonstreze egalitatea

$$m\left(\frac{v_2^2}{2} + gh_2\right) + M\left(\frac{V_2^2}{2} + gH_2\right) = m\left(\frac{v_1^2}{2} + gh_1\right) + M\left(\frac{V_1^2}{2} + gH_1\right).$$

Cu litere mari s-au notat mărimile fizice care caracterizează greutatea cea mare. Indicii 1 şi 2 arată că mărimile respective se referă la cele două momente considerate ale mişcării.

Întrucît greutăţile sînt legate cu o sfoară, avem $v_1 = V_1$, şi $v_2 = V_2$. Servindu-ne de aceste simplificări şi trecînd toţi termenii care conţin înălţimi în membrul al doilea, iar termenii cu viteze în membrul întîi, vom obţine:

$$\frac{m + M}{2}(v_2^2 - v_1^2) = mgh_1 + MgH_1 - mgh_2 - MgH_2 =$$
$$= mg(h_1 - h_2) + Mg(H_1 - H_2).$$

Diferenţele dintre înălţimile greutăţilor sînt, bineînţeles, egale (dar de semn contrar, deoarece o greutate se ridică, iar cealaltă coboară). Aşadar,

$$\frac{m + M}{2}(v_2^2 - v_1^2) = g(M - m)s,$$

în care s este drumul parcurs.

La pag. 44 am văzut că diferenţa pătratelor vitezelor, $v_1^2 - v_2^2$, la începutul şi la sfîrşitul segmentului s de drum parcurs cu acceleraţia a este

$$v_1^2 - v_2^2 = 2as.$$

Înlocuind cu această expresie în formula de mai înainte, găsim că

$$(m + M)\, a = (M - m)\, g.$$

Dar aceasta este legea lui Newton, scrisă mai înainte pentru exemplul nostru. Astfel s-a demonstrat ceea ce era de demonstrat, și anume că, pentru două corpuri, suma expresiilor $\frac{v^2}{2} + gh$, înmulțită cu masele respective[1], rămîne constantă în timpul mișcării sau, cum se spune, se conservă, adică

$$\left(\frac{mv^2}{2} + mgh\right) + \left(\frac{MV^2}{2} + MgH\right) = \text{const.}$$

În cazul unui singur corp, această formulă se transformă în cea demonstrată mai înainte:

$$\frac{v^2}{2} + gh = \text{const.}$$

Jumătate din produsul dintre masă și pătratul vitezei se numește energia cinetică W_k:

$$W_k = \frac{mv^2}{2}.$$

Produsul dintre greutatea corpului și înălțime se numește energia potențială a atracției corpului de către Pămînt:

$$U = mgh.$$

Am demonstrat că, în timpul mișcării unui sistem format din două corpuri (și se poate demonstra același lucru pentru un sistem constînd din mai multe corpuri), suma dintre energia cinetică și energia potențială rămîne constantă.

Cu alte cuvinte, creșterea energiei cinetice a unui grup de corpuri se poate realiza numai pe seama scăderii energiei potențiale a acestui sistem (și, bineînțeles, invers).

Legea demonstrată mai înainte se numește legea conservării energiei mecanice.

Legea conservării energiei mecanice este o lege foarte importantă a materiei. Încă n-am arătat toată importanța ei. Mai tîrziu, cînd vom face cunoștință cu mișcarea moleculelor, se va vedea caracterul ei universal și aplicabilitatea sa la toate fenomenele naturii.

---

[1] Bineînțeles că expresia $\frac{v^2}{2} + gh$ se poate înmulți cu același succes cu $2m$ sau cu $m/2$ și, în general, cu orice coeficient multiplu sau submultiplu al lui m. S-a convenit însă să se procedeze în modul cel mai simplu, adică să se înmulțească pur și simplu cu m.

Lucrul mecanic

Dacă se împinge sau se trage un corp fără a întîmpina nici un obstacol, rezultatul va fi accelerarea corpului. Creşterea energiei cinetice care se produce cu acest prilej se numeşte lucrul mecanic al forţei, şi se notează cu L:

$$L = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2}.$$

Conform legii lui Newton, acceleraţia unui corp şi, prin urmare, şi creşterea energiei cinetice, este determinată de suma vectorială a tuturor forţelor aplicate corpului. Aşadar, în cazul mai multor forţe, formula $L = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2}$ reprezintă lucrul mecanic al forţei rezultante. Să exprimăm acum lucrul mecanic L prin intermediul acestei forţe care îl efectuează.

Pentru simplificare, ne vom mărgini la cazul în care mişcarea

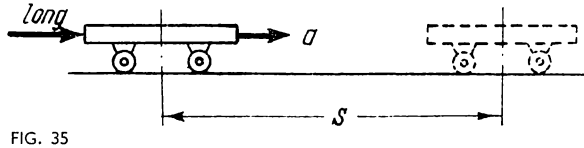


FIG. 35

este posibilă numai într-un sens, adică vom împinge (sau trage) un vagonet de masă m pus pe şine (fig. 35).

Conform formulei generale a mişcării uniforme accelerate, $v_2^2 - v_1^2 = 2as$. De aceea, lucrul mecanic al tuturor forţelor, efectuat pe drumul s, este

$$L = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2} = mas.$$

Produsul ma este egal cu componenta forţei totale pe direcţia mişcării. Aşadar, $L = f_{long} \cdot s$.

Lucrul mecanic al unei forţe se măsoară prin produsul dintre drumul parcurs şi componenta forţei pe direcţia drumului.

Formula lucrului mecanic este valabilă pentru forţe de orice proveniență şi pentru mişcări pe orice traiectorie.

Există cazuri în care lucrul mecanic poate fi egal cu zero, chiar atunci cînd acţionează forţe asupra corpului în mişcare.

De exemplu, lucrul mecanic al forţei Coriolis este egal cu zero, căci această forţă este perpendiculară pe direcţia mişcării. Ea

nu are componentă longitudinală și, de aceea, lucrul mecanic este egal cu zero.

Nici o deformare a traiectoriei neînsoțită de o variație a vitezei nu necesită lucru mecanic, deoarece energia cinetică nu variază.

Poate exista lucru mecanic negativ? Desigur, dacă forța are o direcție și un sens care formează un unghi obtuz cu direcția și sensul mișcării, dar ea nu ajută, ci împiedică mișcarea. Componenta longitudinală a forței pe direcția mișcării va fi negativă. În acest caz, spunem că forța efectuează un lucru mecanic negativ. Forța de frecare întîrzie întotdeauna mișcarea, adică efectuează un lucru mecanic negativ.

După creșterea energiei cinetice se poate aprecia numai lucrul mecanic al forței rezultante.

În ce privește însă lucrul mecanic al forțelor componente, trebuie să-l calculăm făcînd produsele $f_{long} \cdot s$. Un automobil merge cu viteză uniformă pe o șosea. Energia lui cinetică nu crește, deci lucrul mecanic al forței rezultante este egal cu zero. Bineînțeles însă că lucrul mecanic al motorului nu este egal cu zero; el este egal cu produsul dintre forța de tracțiune și drumul parcurs, și este compensat complet de lucrul mecanic negativ al forțelor rezistente și al frecării.

Servindu-ne de noțiunea de lucru mecanic, putem descrie mai pe scurt și mai clar particularitățile interesante ale forței gravitaționale, cu care am făcut cunoștință mai înainte. Dacă sub influența forței gravitaționale, un corp se deplasează dintr-un loc într-altul, energia lui cinetică variază. Această variație a energiei cinetice este egală cu lucrul mecanic L. Știm însă din legea conservării energiei, că creșterea energiei cinetice are loc pe seama scăderii energiei potențiale.

Așadar, lucrul mecanic al forței gravitaționale este egal cu pierderea de energie potențială:

$$L = U_1 - U_2.$$

Evident că scăderea (sau creșterea) energiei potențiale și deci creșterea (sau scăderea) energiei cinetice vor fi egale, indiferent de drumul pe care s-a deplasat corpul. Aceasta înseamnă că lucrul mecanic al forței gravitaționale nu depinde de forma drumului. Dacă corpul a trecut din primul punct în al doilea, mărindu-și energia cinetică, el va trece din al doilea punct în primul, micșorîndu-și energia cinetică cu exact aceeași cantitate. Totodată, este indiferent dacă forma drumului „la dus" coincide cu forma drumului „la întors". Așadar, și lucrurile mecanice „la dus" și „la întors" vor fi identice, iar dacă corpul face o călătorie lungă, dar

sfîrșitul drumului coincide cu începutul său, lucrul mecanic va fi egal cu zero.

Închipuiți-vă un canal de formă cît de neobișnuită, pe care alunecă fără frecare un corp. Să facem acest corp să pornească în călătoria sa din punctul cel mai înalt al canalului. Corpul va porni în jos cu viteză din ce în ce mai mare. Datorită energiei cinetice dobîndite, corpul va învinge un urcuș și, în sfîrșit, va reveni la stația de plecare. Cu ce viteză? Bineînțeles, cu aceea cu care a părăsit această stație. Energia potențială revine la valoarea inițială. Dacă este așa însă, energia cinetică n-a putut nici să se micșoreze, nici să se mărească. Așadar, lucrul mecanic este egal cu zero.

Lucrul mecanic pe un drum circular (în fizică se spune pe un drum închis) nu este egal cu zero pentru toate forțele. Nu este nevoie să demonstrăm, de pildă, că lucrul mecanic al forțelor de frecare va fi cu atît mai mare, cu cît drumul este mai lung.

În ce unități se măsoară lucrul mecanic și energia

Întrucît lucrul mecanic este egal cu variația energiei, lucrul mecanic și energia — bineînțeles atît cea potențială, cît și cea cinetică — se măsoară în aceleași unități. Lucrul mecanic este egal cu produsul dintre forțe și drumul parcurs. Lucrul mecanic al unei forțe de o dină (dyn) pe un drum de un centimetru se numește *erg*:

$$1 \text{ erg} = 1 \text{ dyn} \cdot 1 \text{ cm}.$$

Această unitate de lucru mecanic este foarte mică. Un astfel de lucru mecanic, de un erg, în sens contrar forței gravitaționale este efectuat de un țînțar pentru a zbura de pe degetul cel mare al mîinii pe arătător. O unitate mai mare de lucru mecanic și de energie, care se întrebuințează în fizică, este „joule"-ul (J). El este de 14 milioane de ori mai mare decît ergul:

$$1 \text{ J} = 10 \text{ milioane ergi} = 10^7 \text{ erg}.$$

Destul de des se folosește unitatea de lucru mecanic de 1 kilogram-forță-metru (1 kgfm), care este lucrul mecanic efectuat de o forță de 1 kgf pe un drum de 1 m. Un lucru mecanic avînd aproximativ această valoare este efectuat de o greutate de metal de 1 kg căzînd de pe masă pe podea.

După cum știm, o forță de 1 kgf este egală cu 98 ·100 dyn, iar 1 m este egal cu 100 cm. Așadar 1 kgfm este egal cu 98 ·100 000 erg sau 9,81 J. Invers, 1 J este egal cu 0,102 kgfm.

Noul sistem de unități (SI), despre care am mai amintit și vom mai aminti, propune să se folosească ca unități de lucru mecanic și de energie — joule-ul și să se definească această unitate ca lucrul mecanic al unei forțe de 1 newton (vezi pag. 42) care parcurge un drum de 1 m. Știind ce simplu se determină forța în cazul de față, este ușor de înțeles care sînt avantajele noului sistem de unități.

Scăderea energiei

Cititorul a observat, probabil, că în exemplele date pentru a ilustra legea conservării energiei mecanice, repetăm mereu: „în lipsa frecării, dacă n-ar exista frecare...“ Într-adevăr, frecarea însoțește în mod inevitabil orice mișcare. Dar ce valoare are o lege care nu ține seamă de un factor practic atît de important? Vom amîna răspunsul la această întrebare, iar acum vom căuta să vedem care sînt consecințele frecării.

Forțele de frecare sînt dirijate în sens contrar mișcării și, prin urmare, efectuează un lucru mecanic negativ. De aici rezultă o pierdere inevitabilă de energie mecanică.

Această pierdere inevitabilă de energie mecanică va avea, oare, ca efect oprirea mișcării? Este ușor să ne convingem că nu orice mișcare poate fi oprită de frecare.

Să ne închipuim un sistem închis format din mai multe corpuri care interacționează. După cum am văzut, pentru un astfel de sistem închis este valabilă legea conservării impulsului. Sistemul închis nu-și poate modifica impulsul (sau cantitatea de mișcare) și de aceea se deplasează rectiliniu și uniform. Frecarea în interiorul unui astfel de sistem poate anihila mișcările relative ale părților sistemului, dar nu influențează asupra vitezei și direcției mișcării întregului sistem în ansamblu.

Mai există o lege a naturii, numită legea conservării momentului de rotație (vom face cunoștință cu el mai tîrziu), care nu permite frecării să anihileze rotația uniformă a întregului sistem închis.

Așadar, prezența frecării are ca efect oprirea tuturor mișcărilor dintr-un sistem închis de corpuri, fără a împiedica însă mișcarea rectilinie uniformă sau de rotație uniformă a întregului sistem în ansamblu.

Dacă globul pămîntesc își modifică într-o măsură neînsemnată viteza cu care se rotește, cauza nu este frecarea corpurilor de pe Pămînt unul de altul, ci faptul că Pămîntul nu este un sistem izolat.

În ce privește mișcările corpurilor pe Pămînt, ele sînt toate supuse frecării și-și pierd energia lor mecanică. De aceea, mișcarea se oprește întotdeauna, dacă nu este susținută dinafară.

Aceasta este o lege a naturii. Dar dacă am reuși să înșelăm natura? Atunci... atunci s-ar putea realiza „perpetuum mobile", ceea ce înseamnă pe latinește „mișcarea veșnică".

Perpetuum mobile

La realizarea acestui perpetuum mobile, visa Berthold, eroul „Scenelor din timpurile cavalerilor" de Pușkin. „Ce este perpetuum mobile?" — îl întreabă un interlocutor. „Este mișcarea veșnică, — răspunde Berthold. — Dacă descopăr mișcarea veșnică, nu văd ce ar mai mărgini forța creatoare a omului. A face aur este o problemă ispititoare, descoperirea poate fi interesantă, avantajoasă, dar a găsi soluția cînd este vorba de perpetuum mobile..."

Perpetuum mobile sau motorul veșnic este o mașină care ar trebui să funcționeze nu numai în ciuda legii micșorării energiei mecanice, ci și călcînd legea conservării energiei mecanice, lege valabilă numai în condiții ideale, irealizabile, în lipsa frecării. Motorul veșnic, oricum ar fi construit, trebuie să înceapă să funcționeze „singur" — de exemplu să rotească o roată sau să ridice greutăți de jos în sus. Acest lucru mecanic trebuie să aibă loc veșnic și neîntrerupt, iar motorul nu trebuie să consume nici combustibil, nici să aibă nevoie de mîna omului sau de energia apei care cade — cu un cuvînt, de nimic dinafară.

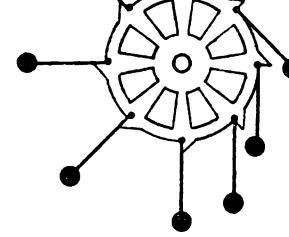


FIG. 36

Primul document autentic cunoscut pînă acum despre „realizarea" ideii motorului veșnic provine din secolul al XIII-lea. E interesant că după șase secole, în anul 1910, la institutele științifice din Moscova a fost prezentat spre „examinare" tocmai un astfel de „proiect".

Proiectul acestui motor veșnic este reprezentat în fig. 36. În timpul învîrtirii roții, greutățile se dau peste cap și, după părerea inventatorului, mențin mișcarea, deoarece greutățile rabătute în afară apasă mult mai puternic, acționînd la distanță mai mare de

axă. După ce a construit această „maşină" extrem de simplă, inventatorul s-a convins că, după una sau două rotaţii, efectuate în virtutea inerţiei, roata se opreşte. Aceasta însă nu l-a descurajat. Probabil că s-a făcut o eroare — şi-a spus el: pîrghiile trebuie să fie făcute mai lungi şi trebuie să se modifice forma proeminenţelor.

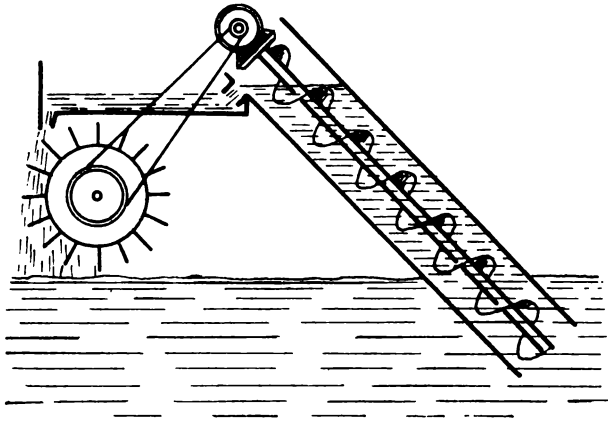


FIG. 37

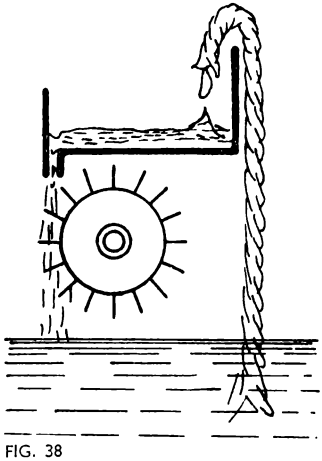


FIG. 38

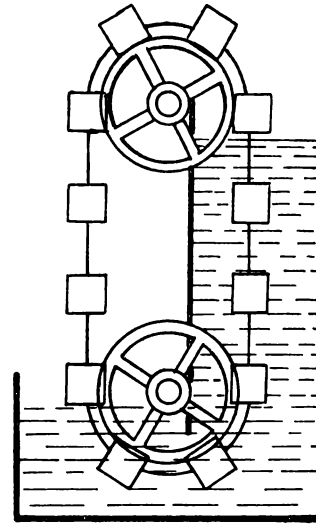


FIG. 39

Şi astfel, munca sterilă, căreia mulţi „inventatori" i-au consacrat toată viaţa, a continuat, dar, bineînţeles, cu acelaşi rezultat.

Variantele motoarelor veșnice care s-au prezentat au fost, în general, puține: diferite roți care ar trebui să se miște singure și care în principiu nu se deosebesc de cea descrisă, motoare hidraulice — de pildă motorul reprezentat în fig. 37, inventat în 1634, motoare utilizînd sifoane sau tuburi capilare (fig. 38), pierderea de greutate în apă (fig. 39), atracția corpurilor din fier de către magneți etc. De multe ori nu se poate ghici pe seama cărui fenomen, după ideea „inventatorului", ar trebui să se producă mișcarea veșnică.

Încă înainte de a se stabili legea conservării energiei, afirmația că este imposibil să se realizeze perpetuum mobile figura într-o declarație oficială a Academiei franceze din anul 1775, cînd aceasta a hotărît să nu mai primească pentru examinare și încercare nici un proiect de mișcare veșnică.

Mulți mecanici din secolele al XVII-lea și al XVIII-lea au pus la baza demonstațiilor lor axioma imposibilității mișcării veșnice, deși noțiunea de energie și legea conservării energiei au intrat în știință mult mai tîrziu.

În prezent este clar că „inventatorii" care încearcă să creeze un motor veșnic nu numai că intră în contradicție cu experiența, dar comit și o eroare contra logicii elementare, căci imposibilitatea mișcării veșnice este o consecință directă a legilor mecanicii, de la care ei înșiși pornesc pentru a fundamenta „invenția" lor.

Cu toată sterilitatea lor desăvîrșită, încercările de a găsi un motor veșnic au jucat totuși un rol util, deoarece în definitiv au condus la descoperirea legii conservării energiei.

Ciocnirile

În orice ciocnire a două corpuri, impulsul se conservă întotdeauna. În ce privește însă energia, ea se micșorează neapărat din cauza frecărilor de tot felul.

Dacă însă corpurile care se ciocnesc sînt făcute dintr-un material elastic, de exemplu din os sau oțel, pierderea de energie va fi neînsemnată.

Ciocnirile în care suma energiilor cinetice înainte și după ciocnire este identică se numesc perfect elastice.

O mică pierdere de energie cinetică se produce și cînd se ciocnesc materialele cele mai elastice: la bilele de biliard făcute din os atinge, de exemplu, 3—4%.

Conservarea energiei cinetice în cazul ciocnirii elastice permite să se rezolve o serie de probleme.

Să considerăm, de pildă, ciocnirea frontală a unor bile de masă egală. Ecuația impulsului are forma (considerăm că bila 2 era în stare de repaus înainte de ciocnire):

$$m_1 v_1 = m_1 u_1 + m_2 u_2,$$

iar energia este

$$\frac{m_1 v_1^2}{2} = \frac{m_1 u_1^2}{2} + \frac{m_2 u_2^2}{2},$$

în care v_1 este viteza primei bile înainte de ciocnire, iar u_1 și u_2 sînt vitezele bilelor după ciocnire.

Întrucît mișcarea are loc după o linie dreaptă (care trece prin centrele bilelor, ceea ce înseamnă că ciocnirea este centrală), s-au neglijat săgețile (semnele de vector) de deasupra literelor.

Din prima ecuație rezultă că

$$u_2 = \frac{m_1}{m_2} (v_1 - u_1),$$

înlocuind această expresie a lui u_2 în ecuația energiei, vom obține

$$\frac{m_1}{2} (v_1^2 - u_1^2) = \frac{m_2}{2} \left[\frac{m_1}{m_2} (v_1 - u_1)\right]^2.$$

Una din soluțiile acestei ecuații este $u_1 = v_1$ și $u_2 = 0$. Acest răspuns însă nu ne interesează, deoarece egalitățile $u_1 = v_1$ și $u_2 = 0$ înseamnă că bilele nu s-au ciocnit de loc. De aceea vom căuta altă soluție a ecuației. Simplificînd cu $m_1 (v_1 - u_1)$, găsim

$$\frac{1}{2} (v_1 + u_1) = \frac{1}{2} \cdot \frac{m_1}{m_2} (v_1 - u_1),$$

adică

$$m_2 v_1 + m_2 u_1 = m_1 v_1 - m_1 u_1,$$

sau

$$(m_1 - m_2) v_1 = (m_1 + m_2) u_1,$$

ceea ce dă următoarea expresie pentru viteza primei bile după ciocnire

$$u_1 = \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} \cdot v_1.$$

În cazul ciocnirii centrale cu o bilă imobilă, bila care loveşte sare înapoi (u_1 este negativ), dacă masa ei este mai mică. Dacă m_1 este mai mare decît m_2, ambele bile continuă mişcarea în direcţia ciocnirii.

La jocul de biliard, în cazul ciocnirii perfect centrale, adesea se observă următoarea situaţie: bila-proiectil se opreşte brusc, iar bila-ţintă se duce în pungă. Aceasta se explică prin ecuaţia găsită mai înainte. Masele bilelor sînt egale, iar ecuaţia dă $u_1 = 0$ şi deci $u_2 = v_1$. Bila care produce ciocnirea se opreşte, iar a doua bilă începe să se mişte cu viteza primei. E ca şi cum bilele ar face schimb de viteze între ele.

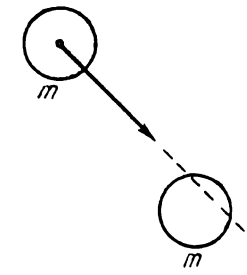


FIG. 40

Să considerăm încă un exemplu de ciocnire a unor corpuri după legea ciocnirii elastice, şi anume ciocnirea oblică a corpurilor de mase egale (fig. 40). Al doilea corp este în repaus înainte de ciocnire şi de aceea legile conservării impulsului şi energiei au forma

$$m\vec{v}_1 = m\vec{u}_1 + m\vec{u}_2,$$

$$\frac{mv_1^2}{2} = \frac{mu_1^2}{2} + \frac{mu_2^2}{2}.$$

Simplificînd cu m, obţinem

$$\vec{v}_1 = \vec{u}_1 + \vec{u}_2,$$

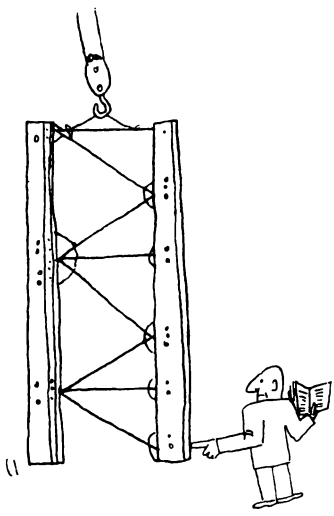
$$v_1^2 = u_1^2 + u_2^2.$$

Vectorul $\vec{v}_1$ este suma vectorială a lui $\vec{u}_1$ şi $\vec{u}_2$. Aceasta înseamnă însă că vectorii-viteză formează un triunghi.

Ce fel de triunghi este acesta? Să ne amintim teorema lui Pitagora. Ea este exprimată de ultima ecuaţie. Înseamnă că triunghiul vitezelor trebuie să fie dreptunghic, cu ipotenuza v_1 şi catetele u_1 şi u_2. Aşadar, u_1 şi u_2 formează între ele un unghi drept. Acest rezulat interesant arată că după orice ciocnire elastică oblică, corpurile de mase egale se depărtează pe direcţii perpendiculare una pe alta.

V

Oscilaţiile



Echilibrul

În unele cazuri este foarte greu să se mențină echilibrul; încercați, de exemplu, să mergeți pe o frînghie întinsă. În același timp, nimeni nu va aplauda pe cineva care șade într-un fotoliu basculant, deși el își menține echilibrul.

Care este diferența dintre aceste două exemple? În care caz echilibrul se stabilește „de la sine"?

Condiția de echilibru este oarecum evidentă. Pentru ca un corp să nu se miște din poziția sa, forțele care acționează asupra lui trebuie să se echilibreze; cu alte cuvinte, suma acestor forțe trebuie să fie egală cu zero. Această condiție este în adevăr necesară pentru ca corpul să fie în echilibru, dar este ea și suficientă?

În fig. 41 este reprezentat profilul unei coline, profil care poate fi confecționat cu ușurință din carton. O bilă se va comporta în mod diferit, în funcție de punctul de pe colină în care este pusă. În orice punct de pe panta colinei, asupra bilei va acționa o forță care o obligă să se rostogolească în jos. Această forță activă este forța gravitațională — (greutatea bilei) sau, mai exact, proiecția ei pe direcția tangentei la profilul colinei, dusă în punctul care ne interesează. Prin urmare, cu cît panta va fi mai lină cu atît forța care acționează asupra bilei va fi mai mică.

Pe noi ne interesează, în primul rînd, punctele în care forța gravitațională este complet echilibrată de reacția în reazem, adică în care forța rezultantă care acționează asupra bilei este egală cu zero. Această condiție va fi îndeplinită pe vîrfurile colinei și în

punctele de jos — în vîlcele. Tangentele în aceste puncte sînt orizontale, iar forțele rezultante care acționează asupra bilei sînt egale cu zero.

Pe vîrfuri, însă, cu toate că forța rezultantă este egală cu zero, bila nu poate sta pe loc, sau dacă stă, descoperim imediat cauza indirectă, care este frecarea. O mică împingere sau o ușoară suflare învinge forța de frecare, iar bila pornește rostogolindu-se în jos.

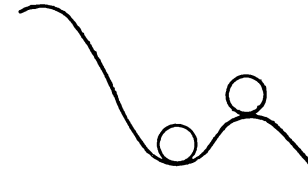


FIG. 41

Poziția de echilibru a unei bile netede pe o colină netedă va fi numai în punctele cele mai de jos ale vîlcelelor. Dacă se scoate bila din această poziție printr-o împingere sau un curent de aer, ea va reveni singură în această poziție.

Într-o vîlcea, într-o groapă sau într-o adîncitură, corpul se va găsi, fără îndoială, în echilibru. Cînd este îndepărtat din această poziție, corpul intră sub influența unei forțe care-l readuce înapoi. În pozițiile de pe vîrfurile colinei, situația este alta: dacă corpul s-a depărtat de această poziție, asupra lui acționează nu o forță de readucere, ci una de „îndepărtare". Prin urmare, forța rezultantă egală cu zero este condiția necesară, dar nu suficientă de echilibru stabil.

Echilibrul unei bile pe o colină poate fi considerat și din alt punct de vedere. Punctele unde se găsesc vîlcelele corespund minimelor, iar vîrfurile corespund maximelor energiei potențiale. Modificarea pozițiilor în care energia potențială este minimă contravine legii conservării energiei. O astfel de modificare ar face energia cinetică negativă și acest lucru este imposibil. Astfel stau lucrurile în punctele de pe vîrfuri. Prin ieșirea din aceste puncte, energia potențială se micșorează și, prin urmare, energia cinetică se mărește, nu se micșorează.

Așadar, în poziția de echilibru, energia potențială trebuie să aibă o valoare minimă în comparație cu valorile din punctele vecine.

Cu cît o groapă este mai adîncă, cu atît stabilitatea este mai mare. Cunoaștem legea conservării energiei și de aceea putem spune imediat în ce condiții un corp va ieși din adîncitură. În acest scop, trebuie să se comunice corpului o energie cinetică suficientă pentru a-l ridica pînă la marginea gropii. Cu cît groapa va fi mai adîncă, cu atît energia cinetică necesară stricării echilibrului stabilit va fi mai mare.

Dacă se dă un impuls unei bile situate într-o adîncitură, ea va începe să se miște la deal, pierzînd treptat din energia sa cinetică. Cînd aceasta va fi pierdută complet, se va produce o oprire momentană și apoi va începe mișcarea bilei în jos. Acum energia potențială se va transforma în energie cinetică. Bila va lua viteză, va trece dincolo de poziția de echilibru în virtutea inerției și va începe din nou să urce, dar în partea opusă. Dacă frecarea este neînsemnată, această mișcare „în sus și-n jos" poate continua foarte multă vreme, iar în cazul ideal — cînd nu există frecare — ea ar dura veșnic.

Așadar, mișcările în apropierea poziției de echilibru stabil au întotdeauna caracter oscilatoriu.

Pentru studiul oscilației este, poate, mai avantajos un pendul decît o bilă care se rostogolește într-o groapă, pentru faptul că la pendul frecarea se poate reduce la minimum.

Cînd greutatea pendulului este deviată în poziția extremă, viteza și energia lui cinetică sînt egale cu zero. Energia potențială în acest moment va fi maximă. Cînd greutatea se va deplasa în jos, energia potențială se va micșora și se va transforma în energie cinetică. Așadar, și viteza va crește. Cînd greutatea trece prin poziția cea mai de jos, energia ei potențială va fi minimă, respectiv atît energia ei cinetică, cît și viteza vor fi maxime. Continuînd mișcarea, greutatea se va ridica din nou. Acum viteza va scădea, iar energia potențială va crește.

Dacă se face abstracție de pierderile prin frecare, greutatea va devia cu aceeași distanță spre dreapta cu care a fost deviată inițial spre stînga. Energia potențială s-a transformat în energie cinetică și apoi s-a creat o „nouă" energie potențială în cantitate egală. Am descris prima jumătate a unei oscilații. A doua jumătate va decurge la fel, cu diferența că greutatea se va mișca în sens contrar.

Mișcarea oscilatorie este o mișcare care se repetă sau, cum se mai spune, este periodică. Revenind în punctul inițial, greutatea repetă de fiecare dată mișcarea sa (dacă nu se ține seama de variațiile din cauza frecării) atît în ce privește drumul, cît și în ce privește viteza și accelerația. Timpul consumat pentru o oscilație, adică pentru reîntoarcerea la punctul de plecare, este identic pentru prima, a doua și toate oscilațiile următoare. Acest timp — una din caracteristicile cele mai importante ale oscilației — se numește perioadă și-l vom nota cu litera T. După un timp T, mișcarea se repetă, adică după timpul T vom găsi întotdeauna corpul osci-

lant în același punct al spațiului și mișcîndu-se în același sens. După o jumătate de perioadă, deplasarea corpului, precum și sensul mișcării își schimbă sensul. Întrucît perioada T este timpul unei oscilații, numărul n de oscilații în unitatea de timp va fi egal cu $1/T$.

De ce depinde perioada oscilației unui corp care se mișcă în apropierea poziției de echilibru stabil? În particular, de ce depinde perioada de oscilație a unui pendul? Primul care și-a pus această întrebare și a răspuns la ea a fost Galilei. Vom deduce imediat formula lui Galilei.

E greu, însă, să se aplice pe cale elementară legile mecanicii la mișcarea neuniform accelerată. De aceea, pentru a ocoli această dificultate, vom obliga greutatea pendulului să nu oscileze într-un plan vertical, ci să descrie un cerc, rămînînd tot timpul la aceeași înălțime. Este ușor de realizat o astfel de mișcare, căci este suficient să se dea un impuls inițial pendulului deviat din poziția de echilibru, și anume exact în direcția perpendiculară pe raza deviației și să se potrivească forța acestui impuls.

În fig. 42 este reprezentat un astfel de „pendul circular".

Greutatea de masă m se mișcă pe un cerc. Așadar, pe lîngă forța gravitațională (greutatea) mg, asupra pendulului acționează forța centrifugă $m \cdot \frac{v^2}{r}$, pe care o putem scrie și sub forma $4\pi^2 n^2 rm$. Aici n este numărul de rotații pe secundă. De aceea, expresia forței centrifuge se poate scrie și astfel: $m \cdot \frac{4\pi^2 r}{T^2}$. Rezultanta acestor două forțe întinde firul pendulului.

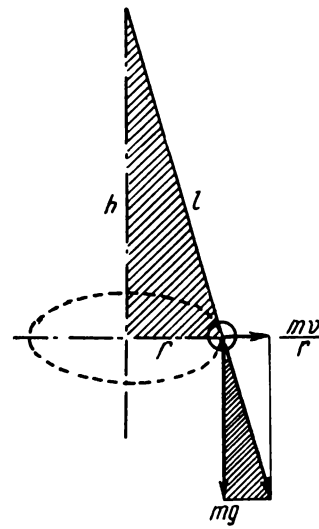


FIG. 42

În figură sînt hașurate două triunghiuri asemenea — triunghiul forțelor și cel al distanțelor. Rapoartele catetelor omologe sînt egale deci

$$\frac{mgT^2}{m4\pi^2 r} = \frac{h}{r} \text{ sau } T = 2\pi\sqrt{\frac{h}{g}}.$$

De ce cauze depinde perioada oscilației pendulului? Dacă facem experiențe în unul și același loc de pe globul pămîntesc (g este

constant), perioada oscilației depinde numai de diferența de înălțime dintre punctul de suspensie și punctul în care se găsește greutatea. Masa greutății, ca întotdeauna în cîmpul gravitațional, nu influențează asupra perioadei de oscilație.

Este interesant următorul fapt. Noi studiem mișcarea în apropierea poziției de echilibru stabil. Cînd este vorba însă de deviații mici, putem înlocui diferența de înălțime h cu lungimea l a pendulului. Acest lucru este ușor de verificat. Dacă lungimea pendulului este de 1 m, iar raza deviației este de 1 cm, avem

$$h = \sqrt{10\,000 - 1} = 99{,}995 \text{ cm}.$$

O diferență de 1% între h și l apare numai la o deviație de 14 cm. Așadar, perioada oscilațiilor libere ale unui pendul pentru deviații nu prea mari de la poziția de echilibru este

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}},$$

adică depinde numai de lungimea pendulului și de valoarea accelerației gravitației în locul unde se face experiența, dar nu depinde de mărimea deviației pendulului de la poziția de echilibru.

Formula $T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$ a fost demonstrată pentru pendulul circular; dar care va fi ea pentru un pendul „plan" obișnuit? Ei bine, formula își păstrează forma. Nu vom demonstra riguros acest lucru, dar atragem atenția că umbra aruncată pe perete de greutatea pendulului circular oscilează aproape la fel ca un pendul plan: umbra face o oscilație exact în același timp în care bila descrie cercul.

Folosirea oscilațiilor mici în jurul poziției de echilibru permite să se facă măsurarea timpului cu foarte mare precizie.

Galilei a stabilit independența perioadei de oscilație a pendulului de amplitudine și de masa acestuia, urmărind în timpul slujbei religioase într-o catedrală felul cum oscilau două candelabre enorme.

Așadar, perioada de oscilație a unui pendul este proporțională cu rădăcina pătrată din lungimea lui. Astfel, perioada de oscilație a unui pendul de un metru este de două ori mai mare decît perioada de oscilație a unui pendul în lungime de 25 cm. Din formula perioadei de oscilație a pendulului mai rezultă că același pendul nu va oscila la fel de repede la diferite latitudini. Pe măsură ce ne apropiem de ecuator, accelerația gravitației se micșorează, iar perioada de oscilație crește.

Perioada de oscilație se poate măsura cu o precizie foarte mare. De aceea, experiențele cu pendule dau posibilitatea de a măsura foarte precis accelerația gravitației.

Desfășurarea oscilațiilor

Să fixăm la partea inferioară a unui pendul un creion moale și să suspendăm pendulul deasupra unei foi de hîrtie în așa fel, încît creionul să atingă hîrtia (fig. 43). Apoi să deviem puțin pendulul. Creionul, oscilînd, va desena pe hîrtie un mic segment de dreaptă. În mijlocul oscilației, cînd pendulul trece prin poziția de echilibru, urma lăsată de creion va fi mai groasă, deoarece în această poziție creionul apasă mai tare pe hîrtie. Dacă se trage foaia de hîrtie într-o direcție perpendiculară pe planul oscilației, se va obține curba din fig. 43. Este ușor de văzut că undele obținute vor fi mai dese dacă se trage hîrtia încet, și mai rare, dacă hîrtia se deplasează cu viteză mai mare. Pentru ca curba obținută să fie regulată, așa ca în figură, este necesar ca foaia de hîrtie să se miște riguros uniform.

În modul acesta am „desfășurat" oarecum oscilațiile.

Desfășurarea este necesară pentru a putea spune unde se găsește și încotro se mișcă greutatea pendulului într-un anumit moment. Închipuiți-vă că hîrtia se deplasează cu viteza de 1 cm/s din momentul cînd pendulul se găsea în poziția extremă, de exemplu, din stînga

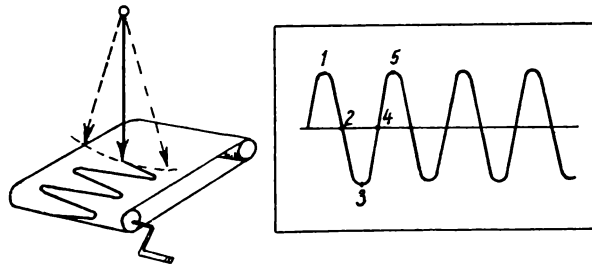


FIG. 43

față de punctul din mijloc. Pe diagrama noastră această poziție inițială corespunde punctului notat cu cifra 1. După un sfert de perioadă, pendulul va trece din punctul median. În acest interval de timp, hîrtia a înaintat cu un număr de centimetri egal cu $\frac{1}{4}T$—

punctul 2 din figură. Acum pendulul se mișcă spre dreapta și în același timp și hîrtia avansează. Cînd pendulul ajunge în poziția extremă din dreapta, hîrtia a avansat cu un număr de centimetri egal cu $\frac{1}{2} T$ — punctul 3 din figură. Apoi pendulul se îndreaptă din nou spre punctul median și ajunge după $\frac{3}{4} T$ în poziția de echilibru — punctul 4 din figură. Punctul 5 încheie o oscilație completă și după aceea fenomenul se repetă după fiecare T secunde sau după fiecare T centimetri de pe diagramă.

Așadar, linia verticală de pe diagramă este axa deplasărilor punctului de la poziția de echilibru, iar linia mediană orizontală reprezintă axa timpului.

Dintr-o astfel de diagramă se găsesc cu ușurință cele două mărimi care caracterizează complet o oscilație. Perioada se definește ca distanța, în timp, dintre două puncte cu același semn, de exemplu, dintre două vîrfuri învecinate. Deplasarea maximă a punctului din poziția de echilibru se numește amplitudinea oscilației.

Desfășurarea oscilațiilor ne permite să răspundem și la întrebarea: unde se găsește punctul oscilant într-un anumit moment? De exemplu, unde va fi punctul oscilant după 11 s, dacă perioada de oscilație este de 3 s, iar mișcarea a început în poziția extremă din stînga? După fiecare 3 s, oscilația începe din același punct. Așadar, după 9 s, corpul va fi din nou în poziția extremă din stînga.

De aceea, nu este nevoie de o diagramă în care curba se întinde pe mai multe perioade; este suficientă curba corespunzătoare unei singure oscilații. Starea punctului oscilant după 11 s, cînd perioada este de 3 s, va fi aceeași ca după 2 s. Luînd pe figură 2 cm (căci am convenit că viteza de avansare a hîrtiei este egală cu 1 cm/s, cu alte cuvinte, că scara figurii este 1 cm = 1 s), vedem că după 11 s punctul se găsește pe drumul de la poziția extremă din dreapta spre poziția de echilibru. Mărimea deplasării în acest moment se găsește de pe figură.

Pentru a găsi mărimea deplasării unui punct care face mici oscilații în jurul poziției de echilibru, nu este neapărat necesar să se recurgă la diagramă. Teoria arată că, în acest caz, curba variației deplasării în funcție de timp reprezintă o sinusoidă. Dacă se notează deplasarea punctului cu y, amplitudinea cu a, iar perioada de oscilație cu T, valoarea deplasării după intervalul de timp t de la începutul oscilației se va găsi cu formula

$$y = a \cdot \sin 2\pi \frac{t}{T} .$$

O oscilație care se supune acestei legi se numește oscilație armonică. Argumentul sinusului este egal cu produsul dintre 2π și t/T. Mărimea $2\pi \frac{t}{T}$ se numește fază.

Avînd la îndemînă tabele de logaritmi și cunoscînd perioada și amplitudinea, este simplu de calculat mărimea deplasării punctului și, pe baza valorii fazei, se poate afla în ce sens se mișcă punctul.

Formula mișcării oscilatorii se deduce ușor examinînd mișcarea umbrei aruncate pe perete de greutatea care se deplasează pe un cerc.

Vom măsura deplasarea umbrei, începînd de la poziția mediană. În pozițiile extreme, deplasarea y este egală cu raza a a cercului. Aceasta este amplitudinea oscilației umbrei.

Dacă din poziția mediană greutatea va parcurge pe un cerc un unghi φ, umbra ei (fig. 44) se va depărta de punctul median cu cantitatea $a \sin \varphi$.

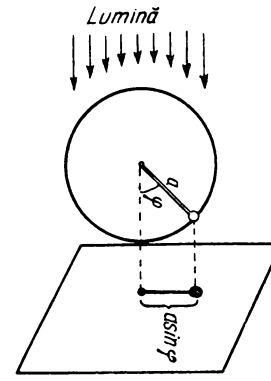


FIG. 44

Să presupunem că perioada mișcării greutății (care coincide, firește, cu perioada de oscilație a umbrei) este T; aceasta înseamnă că greutatea parcurge 2π radiani în timpul T. Se poate scrie proporția $\frac{\varphi}{t} = \frac{2\pi}{T}$, în care t este timpul unei rotații cu un unghi φ.

Așadar, $\varphi = \frac{2\pi t}{T}$, iar $y = a \sin \frac{2\pi t}{T}$. Tocmai aceasta am vrut să demonstrăm.

Viteza punctului oscilant variază tot după o sinusoidă. La această concluzie ajungem prin același raționament asupra mișcării umbrei greutății care descrie un cerc. Viteza acestei greutăți este un vector cu lungime constantă v_0. Vectorul vitezei se rotește împreună cu greutatea. Să ne imaginăm vectorul vitezei ca o săgeată materială capabilă să aibă o umbră. În pozițiile mediane ale greutății, vectorul se va așeza în lungul razei de lumină și nu va arunca nici o umbră. Cînd greutatea pornind din poziția extremă parcurge pe cerc un arc corespunzător unui unghi θ, vectorul vitezei se va roti cu același unghi, iar proiecția lui va fi egală cu $v_0 \sin \theta$. Dar pe

aceeași bază ca și mai înainte, $\frac{\theta}{t} = \frac{2\pi}{T}$ și, prin urmare, valoarea instantanee a vitezei corpului oscilant este

$$v = v_0 \sin \frac{2\pi}{T} t.$$

Atragem atenția asupra faptului că în formula pentru determinarea deplasării, timpul se măsoară de la poziția mediană, iar în formula vitezei, de la poziția extremă. Deplasarea pendulului este egală cu zero în poziția mediană a greutății, iar viteza oscilației este egală cu zero în poziția extremă.

Între amplitudinea vitezei oscilației v_0 (uneori se spune valoarea de amplitudine a vitezei) și amplitudinea deplasării există următoarea relație simplă: greutatea descrie cercul cu lungimea $2\pi a$ într-un timp egal cu perioada de oscilație T. Așadar, $v_0 = \frac{2\pi a}{T}$ și $v = \frac{2\pi a}{T} \sin \frac{2\pi}{T} t$.

Forța și energia potențială în cazul oscilației

În orice oscilație în jurul poziției de echilibru asupra corpului acționează o forță care „caută" să readucă corpul în poziția de echilibru. Cînd corpul se îndepărtează de poziția de echilibru, forța întîrzie mișcarea, iar cînd corpul se apropie de această poziție, forța accelerează mișcarea.

Să urmărim această forță în exemplul pendulului. Pendulul se găsește sub influența forței gravitaționale (greutatea) și a forței de tensiune a firului. Să descompunem forța gravitațională în două componente — una dirijată în lungul firului și alta perpendiculară pe ea, dirijată după tangenta la traiectorie. Pentru mișcare este esențială numai componenta tangențială a forței gravitaționale. Ea este în acest caz forța de readucere a pendulului. În ce privește forța dirijată în lungul firului, ea este echilibrată de reacțiunea din partea cuiului de care atîrnă pendulul și nu trebuie luată în calcul decît atunci cînd ne interesează să știm dacă firul va rezista la greutatea corpului care oscilează.

Să notăm cu x mărimea deplasării pendulului. Deplasarea are loc pe un arc de cerc, dar am convenit să studiem oscilațiile în jurul poziției de echilibru. De aceea, nu vom face deosebire între mărimea deplasării pe arc și devierea pendulului de la verticală. Să

considerăm cele două triunghiuri asemenea (fig. 45). Raportul catetelor omologe este egal cu raportul ipotenuzelor, adică

$$\frac{F}{x} = \frac{mg}{l} \text{ sau } F = \frac{mg}{l} x.$$

Valoarea lui mg/l nu variază în timpul oscilației. Vom nota această valoare constantă cu litera k; atunci forța de readucere va fi $F = kx$. Ajungem deci la următoarea concluzie importantă: forța de readucere este direct proporțională cu deplasarea corpului oscilant de la poziția de echilibru. Forța de readucere este maximă în pozițiile extreme ale corpului care oscilează. Cînd corpul trece prin punctul median, această forță devine egală cu zero și-și schimbă semnul, cu alte cuvinte, sensul. Cînd corpul se deplasează spre dreapta, forța are sensul spre stînga și invers.

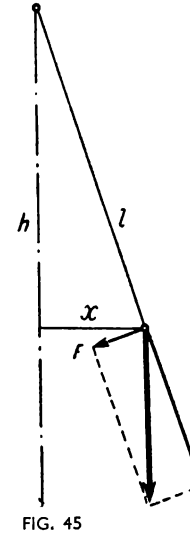


FIG. 45

Pendulul este cel mai simplu exemplu de corp care oscilează. Pe noi însă ne interesează ca formulele și legile pe care le găsim să poată fi aplicate la orice oscilații.

Perioada de oscilație a pendulului a fost exprimată prin lungimea acestuia. Această formulă este bună numai pentru pendul. Putem însă exprima perioada oscilațiilor libere prin constanta forței de readucere k. Întrucît $k = \frac{mg}{l}$, avem $\frac{l}{g} = \frac{m}{k}$ și, prin urmare,

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}.$$

Această formulă se aplică la toate cazurile de oscilații, deoarece orice oscilație liberă are loc sub influența unei forțe de readucere.

Să exprimăm acum energia potențială a pendulului prin deplasarea sa x din poziția de echilibru. Energia potențială a pendulului, cînd acesta trece prin punctul inferior, poate fi considerată ca egală cu zero, iar înălțimea la care se ridică pendulul trebuie să se socotească de la acest punct. Dacă vom nota cu h diferența de înălțime dintre punctul de suspensie și poziția pendulului de-

viat, atunci energia potențială va fi $U = mg(l-h)$ sau, servindu-ne de formula diferenței pătratelor,

$$U = mg \cdot \frac{l^2 - h^2}{l + h}.$$

După cum se vede însă din fig. 45, $l^2 - h^2 = x^2$; l și h diferă foarte puțin și, de aceea, în loc de $l + h$ se poate pune $2l$. Atunci

$$U = \frac{mg}{2l} x^2$$

sau

$$U = \frac{kx^2}{2}.$$

Energia potențială a corpului oscilant este proporțională cu pătratul deplasării corpului din poziția de echilibru.

Să verificăm justețea formulei deduse. Pierderea de energie potențială trebuie să fie egală cu lucrul mecanic al forței de readucere. Să considerăm două poziții, x_2 și x_1, ale corpului. Diferența energiilor potențiale va fi

$$U_2 - U_1 = \frac{kx_2^2}{2} - \frac{kx_1^2}{2} = \frac{k}{2}\left(x_2^2 - x_1^2\right).$$

Dar diferența pătratelor se poate scrie sub formă de produs al sumei cu diferența. Așadar,

$$U_2 - U_1 = \frac{k}{2}\left(x_2 + x_1\right)\left(x_2 - x_1\right) = \frac{kx_2 + kx_1}{2}\left(x_2 - x_1\right).$$

Dar $x_2 - x_1$ este drumul parcurs de corp, kx_1 și kx_2 sînt valorile forței de readucere la începutul și la sfîrșitul mișcării, iar $\frac{kx_1 + kx_2}{2}$ este egal cu forța medie.

Prin urmare, formula găsită ne-a condus la un rezultat corect: energia potențială este egală cu lucrul mecanic efectuat.

Oscilația unui resort

Se poate face cu ușurință să oscileze o bilă, suspendînd-o de un resort. Fixăm unul dintre capetele resortului și tragem în jos de bilă (fig. 46). Resortul va sta întins atîta timp cît tragem de bilă cu mîna. Dacă dăm drumul bilei, resortul se va scurta, iar bila

va începe să se mişte spre poziţia de echilibru. Ca şi pendulul, resortul nu trece imediat în stare de repaus. În virtutea inerţiei, bila va depăşi poziţia de echilibru şi resortul va începe să se comprime. Mişcarea bilei se încetineşte şi la un anumit moment se opreşte, pentru a începe imediat mişcarea în sens contrar. Astfel ia naştere o oscilaţie cu aceleaşi caractere tipice cu care am făcut cunoştinţă cînd am studiat pendulul.

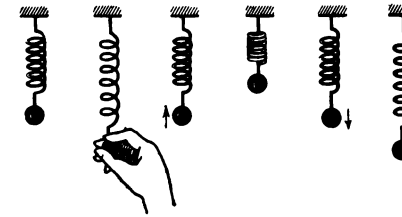


FIG. 46

În lipsa frecării, oscilaţia ar continua la infinit. Cînd există frecare, oscilaţiile se amortizează, şi anume cu atît mai repede cu cît frecarea este mai mare.

Adesea rolul resortului şi al pendulului sînt similare. Atît unul, cît şi celălalt servesc la menţinerea perioadei constante la ceasornice. Mersul exact al ceasornicelor moderne cu resort este asigurat de mişcarea oscilatorie a unui mic balansier. El este pus în mişcare de oscilaţie de un resort care se întinde şi se destinde de zeci de mii de ori pe zi.

La bila suspendată de fir, rolul de forţă de readucere îl juca componenta tangenţială a forţei gravitaţionale (adică a greutăţii pendulului). La bila suspendată de resort, forţa de readucere este forţa de elasticitate a resortului comprimat sau întins. Aşadar, mărimea forţei elastice este direct proporţională cu deplasarea: $F = kx$.

Coeficientul k are în cazul de faţă alt sens. El este acum rigiditatea resortului. Se zice că este rigid un resort greu de întins sau de comprimat. Coeficientul k are tocmai acest înţeles. Din formulă rezultă că acest coeficient este egal cu forţa necesară pentru a întinde sau a comprima resortul cu o unitate de lungime.

Dacă se cunoaşte rigiditatea resortului şi masa corpului suspendat de resort, atunci, cu ajutorul formulei $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$, se poate găsi perioada oscilaţiei libere. De exemplu, un corp cu masă de 10 g, suspendat de un resort cu o rigiditate de 10^5 dyn/cm (acesta este un resort destul de rigid, căci o masă de 100 g îl întinde cu 1 cm), va efectua oscilaţii cu perioada $T = 6{,}28 \cdot 10^2$ s. Într-o secundă deci vor avea loc 16 oscilaţii.

Cu cît resortul este mai moale, cu atît oscilaţiile se produc mai încet. În acelaşi sens influenţează şi mărirea masei corpului.

Să aplicăm bilei suspendate de resort legea conservării energiei.

Știm că, la pendul, suma energiei cinetice și a celei potențiale, $E_c + U$, nu variază:

$$E_c + U = \text{const.}$$

E_c și U pentru pendul ne sînt cunoscute. Legea conservării energiei spune că

$$\frac{mv^2}{2} + \frac{kx^2}{2} = \text{const.}$$

Dar același lucru este adevărat și pentru bila suspendată de resort.

Concluzia pe care trebuie neapărat s-o tragem este interesantă. În afară de energia potențială, cu care am făcut cunoștință mai înainte, mai există, așadar, și o energie potențială de alt gen. Prima se numește energie potențială gravitațională. Dacă resortul ar fi așezat orizontal, energia potențială a gravitației, desigur, n-ar varia în timpul oscilației. Noua energie potențială pusă în evidență de noi se numește energie potențială de elasticitate. În cazul de față, ea este egală cu $kx^2/2$, adică depinde de rigiditatea resortului și este proporțională cu pătratul compresiunii sau întinderii.

Energia totală a oscilațiilor care se menține constantă poate fi scrisă sub forma $E = \frac{ka^2}{2}$ sau $E = \frac{mv_0^2}{2}$.

Mărimile a și v_0, care figurează în ultimele formule, reprezintă valorile maxime pe care le iau deplasarea și viteza în timpul oscilației, adică sînt valorile amplitudinilor deplasării și, respectiv, vitezei. În poziția extremă, cînd $x = a$, energia cinetică a oscilației este egală cu zero, iar energia totală este egală cu energia potențială. În poziția mediană, deplasarea punctului față de poziția de echilibru și, prin urmare, și energia potențială sînt egale cu zero, viteza în acest moment este maximă, $v = v_0$, iar energia totală este egală cu cea cinetică.

Teoria oscilațiilor constituie un capitol vast al fizicii. Cu pendule și resoarte avem de-a face destul de des, dar, desigur, cu aceasta nu s-a terminat lista corpurilor ale căror oscilații trebuie să fie studiate. Fundațiile pe care sînt instalate mașinile oscilează, pot intra în oscilație podurile, părțile de clădiri, grinzile și firele de înaltă tensiune. Sunetele reprezintă oscilații ale aerului.

Am enumerat cîteva exemple de oscilații mecanice. Dar noțiunea de oscilație se poate aplica nu numai la deplasările mecanice ale corpurilor sau particulelor din poziția lor de echilibru. În multe fenomene electrice ne întîlnim, de asemenea, cu oscilații, și anume cu oscilații care au loc după legi foarte asemănătoare cu acelea pe care le-am examinat mai înainte. Teoria oscilațiilor împînzește toate domeniile fizicii.

Oscilații mai complicate

Ceea ce s-a spus pînă acum se referă la oscilații în apropierea poziției de echilibru, care au loc sub influența unei forțe de readucere, direct proporțională cu deplasarea punctului din poziția de

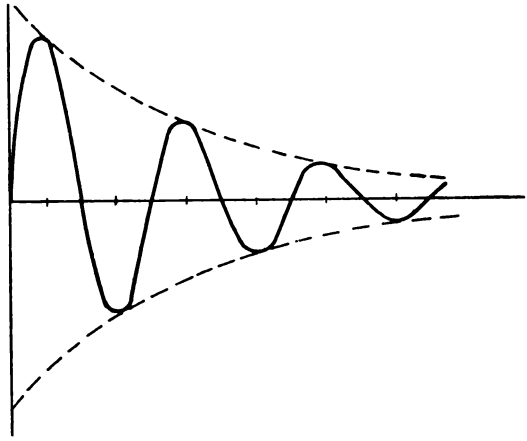


FIG. 47

echilibru. Astfel de oscilații au loc după legea sinusului. Ele se numesc oscilații armonice. Perioada oscilațiilor armonice nu depinde de amplitudine.

Mult mai complicate sînt oscilațiile cu amplitudine mare. Aceste oscilații nu mai au loc după legea sinusului, iar desfășurarea lor dă curbe mai complicate, diferă pentru diferitele sisteme oscilante. Perioada nu mai este o proprietate caracteristică a oscilației și începe să depindă de amplitudine.

Frecarea modifică serios orice oscilații. Cînd există frecare oscilațiile se amortizează treptat. Cu cît frecarea este mai intensă cu atît amortizarea se produce mai repede. Încercați să faceți să oscileze un pendul cufundat în apă. Cu greu se va reuși ca acest pendul să facă mai mult de una sau două oscilații. Dacă se cufundă pendulul într-un mediu foarte vîscos, este posibil ca el să nu oscileze de loc. Pendulul deviat se va întoarce pur și simplu în poziția de echilibru. În fig. 47 este reprezentată diagrama tipică a unei oscilații amortizate. Pe verticală avem abaterea de la poziția de echilibru, iar pe orizontală — timpul. Amplitudinea (deviația maximă) a oscilației amortizate se micșorează la fiecare oscilație.

Rezonanța

Un copil este urcat în leagăn. El nu ajunge cu picioarele la pămînt. Pentru a-l legăna, se poate, firește, ridica leagănul sus și apoi să i se dea drumul. Acest lucru este destul de greu și nici nu-i necesar: este suficient să se dea leagănului un impuls ușor în ritmul oscilațiilor, iar după cîtva timp leagănul va oscila puternic.

Pentru a face un corp să oscileze, trebuie să se acționeze în ritmul oscilațiilor. Cu alte cuvinte, trebuie să se facă în așa fel, încît impulsurile să aibă loc cu aceeași perioadă ca oscilațiile proprii ale corpului. În astfel de cazuri se spune că avem de-a face cu fenomenul de rezonanță.

Fenomenul de rezonanță, foarte răspîndit în natură și în tehnică, merită să fie examinat cu atenție.

Puteți observa acest fenomen foarte interesant și curios cu condiția să construiți următorul dispozitiv. Întindeți un fir orizontal și atîrnați de el trei pendule (fig. 48) — două scurte de aceeași lungime și unul mai lung. Deviați unul din pendulele scurte și apoi dați-i drumul. După cîteva secunde, veți vedea cum celălalt pendul, de aceeași lungime, va începe, treptat, să oscileze. După alte cîteva secunde, și al doilea pendul scurt oscilează, așa încît nu se mai poate ști care dintre ele a început mișcarea mai întîi.

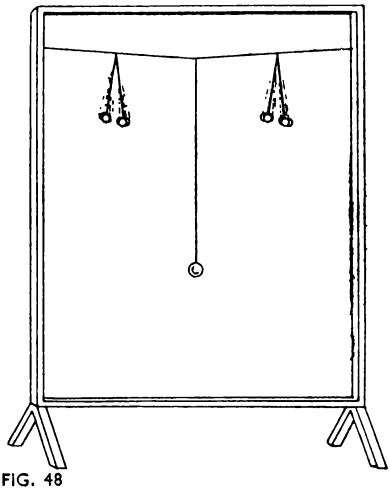


FIG. 48

Ce se întîmplă? Pendulele cu aceeași lungime au perioade proprii de oscilație identice. Primul pendul face să oscileze pe cel de-al doilea. Oscilațiile se transmit de la unul la celălalt prin firul care le leagă între ele. E adevărat, dar de același fir mai atîrnă încă un pendul, de altă lungime. Ce se va întîmpla cu el? Cu el nu se va întîmpla nimic. Perioada acestui pendul este diferită și pendulul cel scurt nu-l poate face să oscileze. Al treilea pendul va „asista" la fenomenul interesant de „transfer" al energiei de la un pendul la celălalt, fără să ia parte la el.

Fiecare dintre noi s-a întîlnit deseori cu fenomenul de rezonanță mecanică. Poate însă că nu i s-a dat atenție, deși uneori rezonanța este foarte supărătoare. Prin fața ferestrelor a trecut un tramvai și în bufet au început să zdrăngăne vasele. Ce s-a întîmplat? Oscilațiile solului s-au transmis la clădire și, împreună cu ea și cu podeaua camerei, au intrat în rezonanță bufetul și vasele din el. Vedeți cît de departe și prin cîte obiecte s-a propagat oscilația! Aceasta datorită rezonanței. Oscilațiile exterioare au intrat în rezonanță cu oscilațiile proprii ale corpurilor. Aproape orice trepidație pe care o auzim în cameră, la fabrică sau în automobil se produce datorită rezonanței.

Fenomenul de rezonanță, ca, de altfel, multe fenomene, poate fi și util și dăunător.

O mașină stă pe o fundație. Piesele sale în mișcare merg ritmic, cu o anumită perioadă. Închipuiți-vă că această perioadă coincide cu perioada proprie a fundației. Ce se va întîmpla? Fundația se va clătina într-un ritm destul de rapid și sfîrșitul poate fi foarte neplăcut.

Este cunoscut faptul că în vechime la Petersburg, la trecerea peste un pod a unei companii de soldați mergînd în cadență, podul s-a prăbușit. S-a ordonat o anchetă asupra afacerii, căci de atîtea ori se adunaseră pe acest pod mulțimi mari de oameni și trecuseră încet care grele, depășind de mai multe ori greutatea companiei de soldați.

Sub influența greutății, podul se încovoaie cu o cantitate neînsemnată. Se poate ajunge însă la o încovoiere incomparabil mai mare dacă podul oscilează. Amplitudinea de rezonanță a oscilației poate fi de o mie de ori mai mare decît valoarea deplasării sub influența unei sarcini egale, dar fixe.

Ancheta a arătat tocmai acest lucru — că perioada proprie de oscilație a podului a coincis cu perioada pasului cadențat obișnuit.

De aceea, cînd o subunitate militară trece pe un pod, se dă comanda de mers de voie. Dacă mișcarea oamenilor nu este coordonată, fenomenul de rezonanță nu se produce, iar podul nu oscilează. De altfel, inginerii țin minte acest caz nenorocit. Cînd proiectează poduri, ei caută să le facă în așa fel, încît perioada de oscilație proprie a podului să fie foarte diferită de perioada pasului cadențat.

Exact așa procedează și constructorii de fundații pentru mașini. Ei caută să facă fundația în așa fel, încît perioada de oscilație a acesteia să fie foarte diferită de perioada de oscilație a pieselor în mișcare ale mașinii.

VI
Mişcarea corpurilor solide

Momentul unei forţe

Încercaţi să învîrtiţi cu mîna o roată grea. Dacă trageţi de o spiţă şi apucaţi cu mîna prea aproape de ax, va fi greu s-o mişcaţi. Dacă însă mutaţi mîna spre obadă, treaba merge mai uşor.

Ce s-a schimbat? Forţa este aceeaşi în ambele cazuri. S-a modificat însă punctul de aplicaţie al forţei.

În expunerea de pînă acum nu s-a pus problema punctului de aplicaţie al forţei, deoarece în exemplele considerate, forma şi dimensiunile corpului nu jucau nici un rol. În fond, noi înlocuim în gînd corpul cu un punct.

Exemplul cu învîrtirea roţii arată că problema punctului de aplicaţie al forţei nu este nicidecum lipsită de importanţă în cazul rotaţiei sau răsucirii unui corp.

Pentru a înţelege rolul punctului de aplicaţie al unei forţe, să calculăm lucrul mecanic care trebuie să fie efectuat pentru a răsuci un corp cu un anumit unghi. În acest calcul, firește, se presupune că toate particulele corpului solid sînt legate rigid între ele (deocamdată facem abstracţie de proprietatea corpului de a se încovoia, de a se comprima şi, în general, de a-şi modifica forma). De aceea, forţa aplicată într-un punct al corpului comunică energie cinetică tuturor părţilor acestuia.

În calculul acestui lucru mecanic, rolul punctului de aplicaţie al forţelor este absolut evident.

În fig. 49 este reprezentat un corp pe o axă. Cînd corpul se rotește cu un unghi foarte mic φ, punctul de aplicație al forței se deplasează pe un arc, parcurgînd drumul s.

Să proiectăm forța pe direcția mișcării, adică pe tangenta la cercul pe care se deplasează și apoi să scriem expresia cunoscută a lucrului mecanic

$$L = F_{\text{long}} \cdot s.$$

Dar arcul s poate fi exprimat astfel:

$$s = r\varphi,$$

în care r este distanța de la axa de rotație pînă la punctul de aplicație al forței. Așadar,

$$L = F_{\text{long}} \cdot r\varphi.$$

Rotind corpul cu același unghi în diferite moduri, putem consuma un lucru mecanic diferit, în funcție de punctul în care se aplică forța.

Dacă unghiul este dat, lucrul mecanic este determinat de produ-

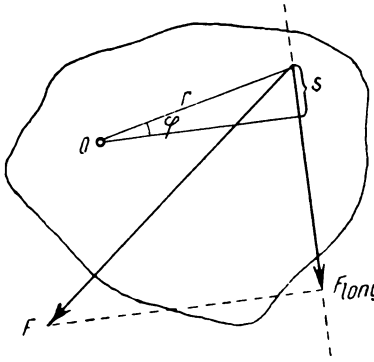


FIG. 49

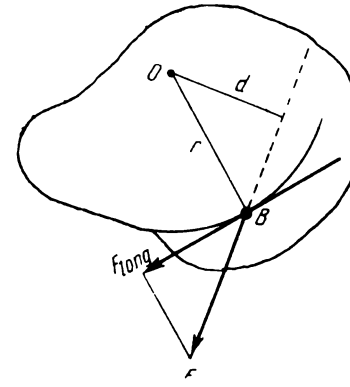


FIG. 50

sul $F_{\text{long}} \cdot r$. Acest produs se numește momentul forței:

$$M = F_{\text{long}} \cdot r.$$

Formulei momentului unei forțe i se poate da și altă formă. Fie O axa de rotație, iar B punctul de aplicație al forței (fig. 50). Cu litera d s-a notat lungimea perpendicularei coborîte din O pe

direcția forței. Cele două triunghiuri construite în figură sînt asemenea. De aceea,

$$\frac{F}{F_{\text{long}}} = \frac{r}{d} \text{ sau } F_{\text{long}} \cdot r = Fd.$$

Mărimea d se numește brațul forței.

Noua formulă $M = Fd$ se citește astfel: momentul unei forțe este egal cu produsul dintre forță și brațul ei.

Dacă punctul de aplicație al forței se deplasează pe direcția forței, brațul d, deci și momentul forței, nu se modifică. Așadar, este indiferent unde se găsește punctul de aplicație pe direcția forței.

Cu ajutorul noii noțiuni, formula lucrului mecanic se scrie mai scurt astfel:

$$L = M\varphi,$$

adică lucrul mecanic este egal cu produsul dintre momentul forței și unghiul de rotație.

Să presupunem că asupra unui corp acționează două forțe cu momentele M_1 și M_2. Cînd corpul se rotește cu un unghi φ, se va efectua lucrul mecanic $M_1\varphi + M_2\varphi = (M_1+M_2)\varphi$. Acest mod prescurtat de a scrie arată că două forțe cu momentele M_1 și M_2 rotesc corpul așa cum ar face-o o singură forță cu momentul M egal cu suma $M_1 + M_2$. Momentele forțelor se pot ajuta sau opune unul altuia. Dacă momentele M_1 și M_2 tind să rotească corpul în același sens, trebuie să considerăm că valorile lor au același semn algebric. Dimpotrivă, momentele forțelor care rotesc corpul în sensuri contrare au semne diferite.

După cum știm, lucrul mecanic al tuturor forțelor care acționează asupra unui corp se consumă pentru modificarea energiei cinetice.

Dacă rotația unui corp a întîrziat sau s-a accelerat, înseamnă că energia lui cinetică a variat. Aceasta se poate întîmpla numai în cazul în care momentul total al forțelor nu este egal cu zero.

Dar dacă momentul total este egal cu zero? Răspunsul este clar: energia cinetică nu variază și, prin urmare, corpul sau se rotește uniform în virtutea inerției, sau este în stare de repaus.

Așadar, pentru echilibrul unui corp capabil să se rotească, este necesar ca momentele forțelor care acționează asupra lui să se echilibreze. Dacă acționează două forțe, atunci pentru a exista echilibru trebuie să existe egalitatea

$$M_1 + M_2 = 0.$$

În problemele în care corpul putea fi considerat ca un punct, condițiile de echilibru erau mai simple: pentru ca un corp să se

găsească în stare de repaus sau să aibă o mișcare uniformă, spunea legea lui Newton cînd era vorba de astfel de probleme, trebuie ca forța rezultantă să fie egală cu zero; forțele care acționează în sus trebuie să fie echilibrate de forțele dirijate în jos; forța din dreapta trebuie să fie compensată de forța din stînga.

Această lege este valabilă și pentru cazul nostru. Dacă roata se găsește în stare de repaus, forțele care acționează asupra ei sînt echilibrate de reacțiunea axului pe care este montată roata.

Dar nu este suficient ca aceste condiții necesare să fie îndeplinite. În afară de echilibrul forțelor, este necesar și echilibrul momentelor forțelor. Echilibrul momentelor este a doua condiție necesară de repaus sau de rotație uniformă a unui corp solid.

Momentele forțelor, dacă sînt mai multe, se împart fără dificultate în două grupe: unele tind să rotească corpul spre dreapta, iar altele spre stînga. Aceste momente trebuie să se compenseze.

Pîrghia

Poate un om să reziste la o greutate de 100 t, se poate turti fierul cu mîna, poate un copil să se opună unui atlet? Da, se poate.

Propuneți unui om puternic să rotească spre stînga o roată apucînd-o cu mîna de o spiță chiar de lîngă ax. Momentul forței în cazul de față va fi mic: forța este mare, dar brațul este mic. Dacă un copil va trage roata în sens contrar, apucînd spița de lîngă obadă, momentul forței poate fi chiar mai mare căci deși forța este mică, în schimb brațul este mare. Condiția de echilibru va fi

$$M_1 = M_2 \text{ sau } F_1 d_1 = F_2 d_2.$$

Folosind legea momentelor, omul poate căpăta o forță fabuloasă.

Cel mai strălucit exemplu este efectul pîrghiilor.

Vreți să ridicați cu o rangă o piatră enormă. Puteți face față acestei sarcini, deși greutatea pietrei este de cîteva tone. Ranga este pusă pe un reazem și reprezintă corpul solid al problemei noastre. Punctul de reazem este centrul de rotație. Asupra corpului acționează momentele a două forțe: unul rezistent — datorit greutății pietrei, și altul activ — datorit mîinii. Dacă indicele 1 se referă la forța musculară, iar indicele 2 la greutatea pietrei, posibilitatea de a ridica piatra se exprimă pe scurt astfel: M_1 trebuie să fie mai mare decît M_2.

Se poate ține piatra în echilibru cu condiția ca

$$M_1 = M_2, \text{ adică } F_1 d_1 = F_2 d_2.$$

Dacă brațul cel scurt — de la reazem pînă la piatră — este de 15 ori mai mic decît brațul cel lung — de la reazem pînă la mînă —, piatra în greutate de 1 t va fi ținută în poziție ridicată de un om acționînd cu toată greutatea sa la capătul brațului cel lung al pîrghiei.

Ranga sprijinită pe un reazem constituie un exemplu foarte răspîndit și cel mai simplu de pîrghie. Cîștigul de forță, cu ajutorul rîngii, este de obicei de 10—20 de ori. Lungimea rîngii este de circa 1,5 m, iar punctul de reazem este de obicei greu de fixat mai aproape de 10 cm de la capăt. De aceea, un braț va fi de 10—20 ori mai lung decît celălalt, ceea ce înseamnă că și cîștigul de forță va fi în aceeași proporție.

Șoferul ridică cu ușurință un autocamion în greutate de cîteva tone cu ajutorul unui cric. Cricul este o pîrghie de același tip cu ranga sprijinită pe un reazem. Punctele de aplicație ale forțelor (mîna, greutatea automobilului) sînt situate de ambele părți ale punctului de reazem al pîrghiei cricului. Aici cîștigul de forță este de 40—50 de ori, ceea ce dă posibilitatea să se ridice cu ușurință o greutate enormă.

Foarfecele, cleștele de spart nuci, cleștele patent, cleștele obișnuit, cleștele de tăiat sîrmă și multe alte scule sînt niște pîrghii.

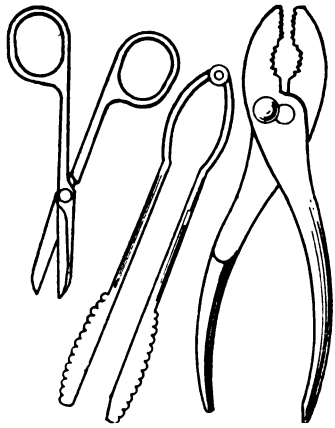


FIG. 51

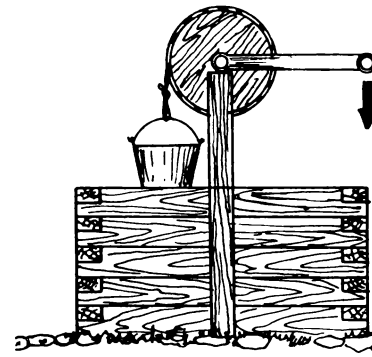


FIG. 52

În fig. 51 găsiți cu ușurință centrul de rotație al corpului solid (punctul de reazem) și punctele de aplicație ale celor două forțe — cea activă și cea rezistentă.

Cînd se taie tabla cu foarfecele, se caută să se deschidă fălcile lui cît mai mult. Care este rezultatul? În modul acesta se bagă meta-

lul cît mai aproape de centrul de rotație. Brațul momentului rezistent al forțelor devine mai scurt, iar cîștigul de forță devine deci mai mare. Apropiind urechile foarfecelui sau strîngînd mînerele cleștelui de tăiat sîrmă, un om adult exercită de obicei un efort de 40—50 kg. Un braț poate fi de 20 ori de mai lung decît celălalt. În felul acesta putem pătrunde în metal cu o forță de 1 t și aceasta, cu ajutorul unor scule atît de simple.

O varietate de pîrghie este vîrtejul sau troliul. Cu ajutorul unui vîrtej (fig. 52) se scoate apă din puț.

Cîștigul de drum parcurs

Uneltele fac pe om puternic, dar de aici nu rezultă de loc că uneltele permit să se cheltuiască lucru mecanic puțin și să se obțină mult. Legea conservării energiei arată, în mod convingător, că cîștigul de lucru mecanic, adică producerea de lucru mecanic din „nimic", este ceva imposibil.

Nu se poate obține mai mult lucru mecanic decît s-a cheltuit. Dimpotrivă, pierderile inevitabile de energie prin frecare au ca rezultat că lucrul mecanic obținut cu ajutorul unei unelte este întotdeauna mai mic decît cel cheltuit. În cazul ideal, aceste lucruri mecanice pot fi egale.

La drept vorbind, ne pierdem timpul degeaba, vrînd să lămurim acest adevăr evident, căci regula momentelor a fost dedusă din condiția de egalitate a lucrurilor mecanice ale forței active și celei rezistente.

Dacă punctele de aplicație ale forțelor au parcurs drumurile s_1 și s_2, condiția de egalitate a lucrurilor mecanice se va scrie astfel:

$$F_{1\ \text{long}} \cdot s_1 = F_{2\ \text{long}} \cdot s_2.$$

Pentru a învinge, cu ajutorul unei unelte cu pîrghie, o forță oarecare F_2 pe distanța s_2, este suficientă o forță F_1 mult mai mică decît F_2, dar deplasarea s_1 a mîinii trebuie să fie de atîtea ori mai mare decît s_2 de cîte ori forța musculară F_1 este mai mică decît F_2.

Adesea această lege se exprimă prin următoarea frază scurtă: cîștigul de forță este egal cu pierderea de drum parcurs.

Regula pîrghiei a fost descoperită de cel mai mare învățat al antichității: Arhimede. Captivat de forța demonstrațiilor, acest celebru învățat al antichității a scris tiranului Gheron din Sira-

ARHIMEDE (aproximativ 287—212 î.e.n.) — cel mai mare matematician, fizician şi inginer al antichităţii. Arhimede a calculat volumul şi suprafaţa sferei şi a părţilor ei, a cilindrului şi a corpurilor formate prin rotirea unei elipse, hiperbole şi parabole. El a calculat cu precizie destul de mare raportul dintre lungimea cercului şi diametrul său şi a arătat că e cuprins între limitele $3\frac{10}{17} < \pi < 3\frac{1}{7}$. În mecanică el a stabilit legile pîrghiei, condiţiile de plutire a corpurilor („principiul lui Arhimede"), legile compunerii forţelor paralele. Arhimede a inventat o maşină pentru ridicarea apei („şurubul lui Arhimede"), care se întrebuinţează şi în vremea noastră pentru transportul materialelor pulverulente şi vîscoase, un sistem de pîrghii şi scripeţi pentru ridicarea greutăţilor mari şi maşini de război aruncătoare de ghiulele, care au fost folosite cu succes în timpul asediului oraşului său natal, Siracuza, de către romani.

cuza: „Dacă ar exista alt Pămînt, m-aș duce pe el și aș muta din loc Pămîntul nostru". O pîrghie foarte lungă, al cărei punct de reazem ar fi situat în apropierea globului pămîntesc, ar da, chipurile, posibilitatea de a rezolva această problemă.

Nu vom deplînge împreună cu Arhimede lipsa unui punct de reazem, care, după cum credea el, era ceea ce-i lipsea pentru a muta din loc globul pămîntesc.

Să dăm frîu liber fanteziei: să luăm o pîrghie extrem de solidă să o sprijinim de un reazem, iar la capătul brațului celui scurt „să suspendăm o micuță bilă" în greutate de... $6 \cdot 10^{24}$ kgf. Această cifră modestă arată cît cîntărește globul pămîntesc „comprimat într-o mică bilă". Acum să aplicăm la capătul brațului celui lung al pîrghiei forța musculară a unui om.

Dacă se consideră că forța mîinii lui Arhimede era de 60 kgf, pentru deplasarea „nucșoarei pămîntești" cu 1 cm, mîna lui Arhimede ar trebui să parcurgă un drum de $\frac{6 \cdot 10^{24}}{60} = 10^{23}$ ori mai mare. 10^{23} cm înseamnă 10^{18} km, adică o distanță de trei miliarde de ori mai mare decît diametrul orbitei pămîntești.

Acest exemplu anecdotic arată limpede proporțiile „cîștigului de drum parcurs" cînd se face uz de o pîrghie.

Oricare din exemplele examinate mai înainte poate fi folosit ca ilustrație nu numai a cîștigului de forță, ci și a cîștigului de drum parcurs. Mîna șoferului care mișcă în sus și în jos levierul cricului efectuează un drum care va fi de atîtea ori mai mare decît înălțimea cu care se ridică automobilul de cîte ori forța musculară este mai mică decît greutatea mașinii. Cînd mișcăm urechile foarfecelui pentru a tăia o foaie de tablă, efectuăm un lucru mecanic pe un drum de atîtea ori mai mare decît grosimea materialului tăiat de cîte ori forța musculară este mai mică decît rezistența tablei. O piatră acționată cu ranga se va ridica la o înălțime de atîtea ori mai mică decît distanța cu care se coboară mîna, de cîte ori forța musculară este mai mică decît greutatea pietrei. Această regulă face mai ușor de înțeles principiul funcționării șurubului. Să ne închipuim că un bulon cu pasul filetului de 1 mm este înșurubat cu ajutorul unei chei de piuliță de 30 cm lungime. La o învîrtitură, șurubul se va deplasa în lungul axei sale cu 1 mm, iar mîna va parcurge în același timp un drum de 2 mm. Cîștigul de forță este de 2 000 de ori, fie că fixăm solid piesele, fie că deplasăm cu un efort ușor al mîinii greutăți mari.

Drumul suplimentar parcurs în schimbul cîștigului de forță este o lege generală nu numai a uneltelor cu pîrghie, ci și a altor dispozitive și mecanisme folosite de om.

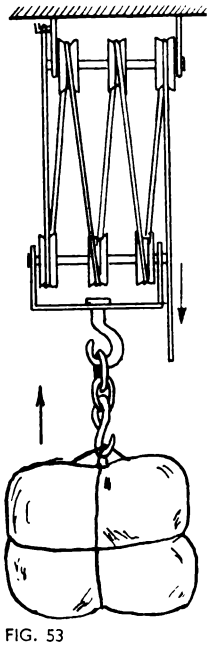


FIG. 53

Pentru ridicarea greutăților se folosesc foarte mult palanele. Așa se numește un sistem de mai mulți scripeți mobili uniți cu unul sau mai mulți scripeți ficși. În fig. 53, sarcina atîrna de șase funii. Bineînțeles că greutatea sarcinii se distribuie, iar tensiunea fiecărei funii va fi de șase ori mai mică decît greutatea sarcinii. Pentru ridicarea unei sarcini în greutate de 1 t, este necesar să se aplice forță de 1 000 : 6 = 167 kgf. Dar este ușor de văzut că, pentru ridicarea sarcinii la înălțimea de 1 m, trebuie să se tragă 6 m de frînghie. Pentru a ridica o sarcină la înălțimea de 1 m este necesar un lucru mecanic de 1 000 m·kgf. Acest lucru mecanic trebuie să-l furnizăm „sub orice formă"; o forță de 1 000/6 kgf trebuie să parcurgă 6 m, o forță de 10 kgf trebuie să parcurgă 100 m, iar o forță de 1 kgf trebuie să parcurgă 1 km.

Planul înclinat, despre care am vorbit la p. 26, reprezintă de asemenea un dispozitiv care permite să se cîștige forță în dauna drumului parcurs.

Un mijloc de un gen special de înmulțire a forței este lovirea. O lovitură de ciocan, de topor, de berbec sau pur și simplu o lovitură de pumn poate produce o forță enormă. Secretul loviturii puternice este simplu. Pentru a bate cu ciocanul un cui într-un perete neelastic trebuie să se ia avîntul necesar. Un avînt mare, adică un drum lung pe care acționează forța, produce o energie cinetică însemnată a ciocanului. Această energie este cedată pe un drum scurt. Dacă avîntul este de 1/2 m, iar cuiul a intrat în perete cu 1/2 cm, forța s-a mărit de 100 de ori. Dacă însă peretele este mai tare și cuiul intră în el cu 1/2 mm, la același avînt al mîinii, lovitura va fi de 10 ori mai puternică decît în primul caz. Într-un perete tare, cuiul nu pătrunde atît de adînc și același lucru mecanic se pierde pe un drum mai scurt. Rezultă de aici că ciocanul lucrează ca un automat: bate mai tare acolo unde este mai greu.

Dacă se „repede" ciocanul cu o forță de 1 kgf, el lovește cuiul cu o forță de 100 kgf, iar dacă despicăm lemne cu un topor greu, spargem lemnul cu o forță de cîteva tone. Ciocanele grele de fierar cad de la înălțime mică, de ordinul unui metru. Cînd turtește, cu 1—2 mm, o piesă forjată, un ciocan în greutate de o tonă se năpustește asupra acesteia cu o forță enormă de mii de tone.

Cum se compun forțele paralele care acționează asupra unui corp solid

Cînd am rezolvat probleme de mecanică în care un corp era înlocuit imaginar cu un punct, problema compunerii forțelor s-a soluționat simplu. Regula paralelogramului a dat răspunsul la această întrebare; dacă forțele erau paralele, le adunam ca pe niște numere.

Acum problema este mai complicată, căci acțiunea unei forțe asupra unui obiect se caracterizează nu numai prin intensitatea (valoarea) și direcția ei, ci și prin punctul ei de aplicație sau — ceea ce am lămurit mai înainte că este același lucru — prin linia de acțiune a forței (suportul acesteia).

A compune forțele înseamnă a le înlocui cu una singură. Acest lucru nu este întotdeauna posibil.

Înlocuirea mai multor forțe paralele cu o rezultantă unică este o problemă care se poate rezolva întotdeauna (cu excepția unui singur caz special, despre care se va vorbi la sfîrșitul acestui paragraf). Să considerăm compunerea forțelor paralele. Firește, suma unor forțe de 3 kgf și 5 kgf este egală cu 8 kgf, dacă forțele au același sens. Problema constă în a găsi punctul de aplicație (linia de acțiune) al rezultantei.

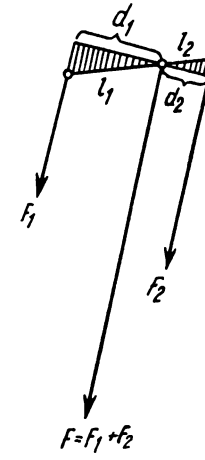


FIG. 54

În fig. 54 sînt reprezentate două forțe care acționează asupra unui corp. Forța totală F înlocuiește forțele F_1 și F_2, dar aceasta nu înseamnă numai că $F = F_1 + F_2$; efectul forței F va fi echivalent cu efectul forțelor F_1 și F_2 numai în cazul în care și momentul forței F va fi egal cu suma momentelor lui F_1 și F_2.

Să căutăm suportul forței totale F. Desigur, el este paralel cu forțele F_1 și F_2, dar la ce distanțe de forțele F_1 și F_2 se află acest suport?

Ca punct de aplicație al forței F, în figură este reprezentat un punct situat pe segmentul de dreaptă care unește punctele de aplicație ale forțelor F_1 și F_2. Momentul forței F în raport cu punctul ales este, bineînțeles, egal cu zero. Dar atunci suma momentelor forțelor F_1 și F_2 în raport cu acest punct trebuie, de asemenea, să fie egal cu zero, adică momentele forțelor F_1 și F_2, de semne contrare, vor fi egale ca valoare.

Notînd cu d_1 și d_2 brațele forțelor F_1 și respectiv F_2, putem scrie această condiție astfel:

$$F_1 d_1 = F_2 d_2, \text{ adică } \frac{F_1}{F_2} = \frac{d_2}{d_1}.$$

Din asemănarea triunghiurilor hașurate rezultă că $\frac{d_2}{d_1} = \frac{k_2}{l_1}$, adică punctul de aplicație al forței totale pe segmentul de legătură împarte distanța dintre forțele care se compun în părțile l_1 și l_2, invers proporționale cu forțele.

Să notăm cu l distanța dintre punctele de aplicație ale forțelor F_1 și F_2. Evident, $l = l_1 + l_2$.

Să rezolvăm sistemul de două ecuații cu două necunoscute:

$$F_1 l_1 - F_2 l_2 = 0,$$

$$l_1 + l_2 = l.$$

Obținem:

$$l_1 = \frac{F_2}{F_1 + F_2}, \qquad l_2 = \frac{F_1}{F_1 + F_2}.$$

Cu ajutorul acestor formule putem găsi punctul de aplicație al rezultantei forței nu numai în cazul în care forțele au același sens, ci și în cazul forțelor dirijate în sensuri contrare (antiparalele). Dacă forțele sînt dirijate în sensuri opuse, ele au semne contrare, iar rezultanta este egală cu diferența $F_1 - F_2$ a forțelor, nu cu suma lor. Considerînd ca negativă pe cea mai mică dintre cele două forțe, adică F_2, vedem din formulele de mai înainte că l_1 se consideră negativ. Aceasta înseamnă că punctul de aplicație al forței F_1 nu este situat la stînga (ca mai înainte), ci la dreapta punctului de aplicație al rezultantei (fig. 55), dar, ca și mai înainte,

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{l_2}{l_1}.$$

Un rezultat interesant se obține cînd forțele antiparalele sînt egale, adică atunci cînd $F_1 + F_2 = 0$. Formulele de mai înainte arată că l_1 și l_2 devin atunci infinit de mari. Care este însă sensul fizic al acestei afirmații? Întrucît este absurd să se aplice rezultanta la infinit, înseamnă că forțele antiparalele egale nu pot fi înlocuite cu una singură. O astfel de combinație de forțe se numește cuplu.

Efectul unui cuplu nu se poate reduce la efectul unei singure forțe. Orice pereche de forțe paralele sau antiparalele poate fi echilibrată de o singură forță, dar un cuplu nu.

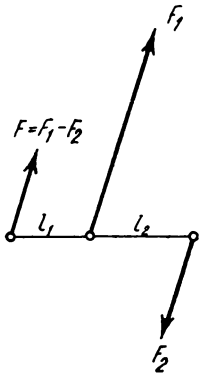


FIG. 55

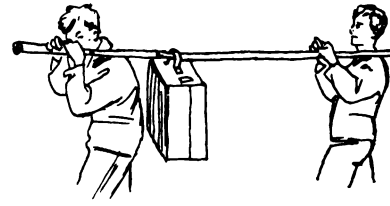


FIG. 56

Bineînțeles că ar fi neadevărat să spunem că forțele care formează un cuplu se anulează reciproc. Cuplul are un efect foarte important: rotește corpul; particularitatea efectului cuplului este că nu produce o mișcare de translație.

În unele cazuri nu se pune problema compunerii forțelor paralele, ci a descompunerii unei forțe date în două forțe paralele.

În fig. 56 sînt reprezentați doi oameni care duc împreună pe un suport de lemn (o prăjină) un geamantan greu. Greutatea geamantanului se împarte la amîndoi. Dacă sarcina apasă la mijlocul prăjinii, ei simt pe umăr aceeași greutate. Dacă distanțele de la punctul de aplicație al sarcinii pînă la umerii celor care o poartă sînt d_1 și respectiv d_2, forța F se descompune în forțele F_1 și F_2, după regula

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{d_2}{d_1}.$$

Omul mai puternic trebuie să pună umărul mai aproape de sarcină.

Centrul de greutate

Toate particulele unui corp au greutate. De aceea, un corp greu se află sub influența unui număr infinit de forțe gravitaționale. Toate aceste forțe sînt paralele. Ele pot fi compuse după legile cunoscute și studiate mai înainte și pot fi înlocuite cu una singură. Punctul de aplicație al forței totale (rezultantei) se numește centru de greutate. În acest punct pare că este concentrată greutatea corpului.

Să suspendăm corpul de unul din punctele sale. Ce poziție va lua el? Întrucît putem înlocui imaginar corpul printr-o singură greutate concentrată în centrul de greutate, este clar că în stare de echilibru, această greutate se va găsi pe verticala care trece prin punctul de suspensie. Cu alte cuvinte, la echilibru, centrul de greutate se află pe verticala care trece prin punctul de suspensie și se găsește în poziția cea mai de jos.

Centrul de greutate poate fi așezat pe verticala care trece prin axă și deasupra punctului de reazem. Acest lucru se poate face cu mare greutate și numai datorită frecării care există între corp și reazem. Un astfel de echilibru este nestabil.

Am vorbit deja despre condițiile de echilibru stabil: energia potențială trebuie să fie minimă. Ea este minimă în cazul în care centrul de greutate se află mai jos decît punctul de reazem. Orice deviere de la această poziție face să se ridice centrul de greutate și, deci, mărește energia potențială. Dimpotrivă, cînd centrul de greutate se găsește deasupra punctului de reazem, orice adiere care ars coate corpul din această poziție are ca efect o micșorare a energiei potențiale. O astfel de poziție este nestabilă.

Să tăiem o figură din carton. Pentru a găsi centrul ei de greutate, o suspendăm de două ori, o dată de un punct al figurii și a doua oară de un altul, tot al figurii. Locul de intersecție al prelungirilor firului, trasate pe figură, este centrul de greutate căutat. Să suspendăm figura chiar de centrul de greutate și să o răsucim în diverse poziții. Observăm că corpul este indiferent la operațiile noastre. În orice poziție se realizează cazul special al echilibrului. Acesta chiar așa se și numește: echilibru indiferent.

Cauza este clară: în orice poziție a figurii, punctul material care o înlocuiește se găsește în același loc.

În unele cazuri, centrul de greutate se poate determina și fără experiențe și calcule. Este limpede că, de exemplu, centrul de greutate la sferă, cerc, pătrat și dreptunghi se găsește în centrul geometric al acestor figuri, deoarece ele sînt simetrice. Dacă descompunem în minte un corp simetric în părticele mici, fiecăreia din ele îi va

corespunde alta situată simetric de cealaltă parte a centrului. Pentru fiecare pereche de astfel de particule, centrul figurii este și centru de greutate.

La un triunghi, centrul de greutate este situat la intersecția medianelor. În adevăr, să descompunem triunghiul în fîșii foarte înguste, paralele cu una din laturi. Mediana împarte în două părți egale fiecare din aceste fîșii. Dar centrul de greutate al unei fîșii se găsește, firește, la mijlocul ei, adică pe mediană. Centrele de greutate ale tuturor fîșiilor cad pe mediană și, cînd vom compune greutățile lor, vom ajunge la concluzia că centrul de greutate este situat undeva pe mediană. Dar acest raționament este adevărat pentru oricare dintre mediane. De aceea, centrul de greutate al triunghiului trebuie să se găsească la intersecția lor.

Poate însă că nu sînteți convinși că cele trei mediane se intersectează în același punct. Acest lucru se demonstrează în geometrie, dar și raționamentul nostru demonstrează această teoremă interesantă. În adevăr, un corp nu poate avea mai multe centre de greutate și întrucît centrul de greutate este unic și situat pe mediană, indiferent din care unghi am duce-o, înseamnă că toate trei medianele se intersectează în același punct. Punerea problemei fizice ne-a ajutat deci să demonstrăm teorema geometrică.

Este mai greu de găsit centrul de greutate al unui con omogen. Din motive de simetrie, centrul de greutate trebuie să se găsească pe axa conului. Calculul arată că el este situat la distanța de 1/4 din înălțime față de bază și, respectiv, la 3/4 din înălțime față de vîrf.

Centrul de greutate nu este situat neapărat în interiorul corpurilor.

De pildă, centrul de greutate al unui inel se găsește în centrul geometric al acestuia, adică în afara inelului.

Se poate așeza în mod stabil un ac cu gămălie în poziție verticală pe o placă de sticlă orizontală?

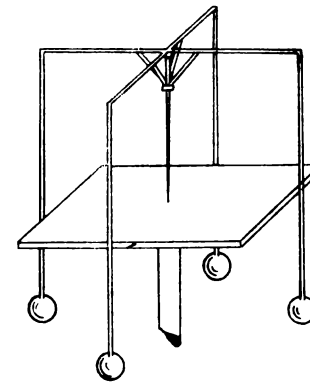


FIG. 57

În fig. 57 se arată cum se poate face acest lucru. Trebuie să se solidarizeze cu acul un mic dispozitiv de sîrmă în formă de cobiliță dublă, cu niște mici greutăți fixate la capete. Întrucît greutățile sînt suspendate mai jos decît punctul de reazem, iar greutatea acului cu gămălie este mică,

centrul de greutate se găsește sub punctul de reazem, prin urmare poziția ansamblului este stabilă.

Pînă acum a fost vorba despre corpuri avînd un punct de reazem. Cum stau lucrurile în cazul în care corpul se reazemă pe o suprafață?

E limpede că, în acest caz, poziția centrului de greutate deasupra reazemului nu constituie un indiciu că echilibrul este nestabil. Altminteri, cum ar putea sta paharele pe masă? Pentru ca să existe stabilitate, trebuie ca suprafața de reazem a corpului să apese pe suprafața pe care acesta este așezat. De aceea, un corp care se reazemă pe o suprafață va avea o poziție stabilă, dacă linia de acțiune a greutății sale, dusă din centrul de greutate, trece prin suprafața de reazem. Invers, dacă linia de acțiune a greutății nu trece prin suprafața de reazem, corpul se răstoarnă.

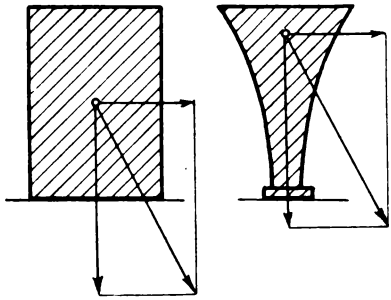


FIG. 58

Gradul de stabilitate poate fi foarte diferit, în funcție de înălțimea la care se găsește centrul de greutate deasupra reazemului. Un pahar cu ceai va fi răsturnat numai de un om prea stîngaci, dar o vază cu flori cu bază mică poate se răsturna la o mică atingere din neatenție. Care este cauza?

Priviți fig. 58. Aceeași forță de răsturnare, compusă cu greutatea, dă o rezultantă care apasă corpul pe reazem, dacă centrul de greutate este situat jos, pe cînd dacă centrul de greutate este situat sus, rezultanta nu trece prin suprafața de reazem, ci cade în afara acesteia.

Am spus că, pentru stabilitatea corpului, trebuie ca forța aplicată acestuia să treacă prin suprafața de reazem. Dar suprafața de reazem necesară pentru echilibru nu corespunde întotdeauna cu suprafața efectivă de reazem. În fig. 59 este reprezentat un corp a cărui suprafață de reazem are forma de semilună. Este ușor de imaginat că stabilitatea acestui corp nu se va modifica dacă semiluna ar fi completată și ar forma un semicerc. Așadar, suprafața de reazem care determină condiția de echilibru poate fi mai mare decît cea efectivă.

Pentru a găsi suprafața de reazem a trepiedului reprezentat în fig. 60, trebuie să unim vîrfurile picioarelor lui prin niște segmente de dreaptă.

De ce este atît de greu de mers pe o frînghie? Pentru că suprafața de reazem este foarte mică. Nu e ușor de mers pe frînghie și nu degeaba o acrobație reușită este aplaudată. Uneori însă spectatorii greșesc și consideră ca o culme a artei trucurile dibace care ușurează această sarcină. Acrobatul duce cu el o cobiliță foarte încovoiată,

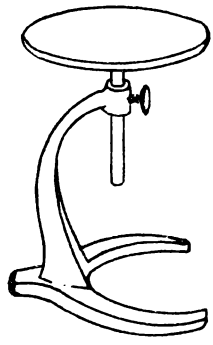


FIG. 59

FIG. 60

cu două găleți cu apă la capetele ei; aceste găleți se găsesc la nivelul frînghiei. Cu mușchii feței încordați, în timp ce orchestra a tăcut, acorbatul trece de la un capăt la altul al frînghiei. Spectatorul neinițiat are impresia că performanța s-a complicat prin prezența găleților, pe cînd de fapt acrobatul și-a ușurat sarcina, coborînd centrul de greutate.

Centrul de inerție

Este foarte legitim să se pună întrebarea: unde se găsește centrul de greutate al unui grup de corpuri? Dacă pe o plută se găsesc mai mulți oameni, de punctul unde este situat centrul lor comun de greutate (împreună cu pluta) depinde stabilitatea plutei.

Sensul noțiunii rămîne același: centrul de greutate este punctul de aplicație al rezultantei greutăților tuturor corpurilor din grupul considerat.

Pentru două corpuri, rezultatul calculului ne este cunoscut. Dacă două corpuri cu greutățile G_1 și G_2 se găsesc la distanța x, centrul de greutate se află la distanța x_1 de primul și x_2 de al doilea corp, astfel ca

$$x_1 + x_2 = x \text{ și } \frac{G_1}{G_2} = \frac{x_2}{x_1}.$$

Întrucît greutatea poate fi reprezentată prin produsul mg, centrul de greutate al unei perechi de corpuri satisface condiția

$$m_1 x_1 = m_2 x_2,$$

adică este situat într-un punct care împarte distanța dintre mase în părți invers proporționale cu masele.

Reamintim acum tragerea cu tunul instalat pe un vagon-platformă. Impulsurile tunului și proiectilului sînt dirijate în sensuri opuse. Avem egalitatea:

$$m_1 v_1 = m_2 v_2, \text{ sau } \frac{v_2}{v_1} = \frac{m_1}{m_2},$$

raportul dintre viteze păstrîndu-și această valoare în tot timpul cît durează interacțiunea. În timpul mișcării care a luat naștere datorită reculului, tunul și proiectilul se deplasează în raport cu poziția inițială la distanțele x_1 și respectiv x_2 în sensuri opuse. Distanțele x_1 și x_2 — drumurile parcurse de cele două corpuri — cresc mereu, dar deoarece raportul dintre viteze este constant, rezultă că și raportul dintre x_1 și x_2 se va menține tot timpul constant:

$$\frac{x_2}{x_1} = \frac{m_1}{m_2}, \text{ sau } x_1 m_1 = x_2 m_2.$$

Aici x_1 și x_2 sînt distanțele de la tun și, respectiv, de la proiectil pînă la punctul în care se găseau inițial. Comparînd această formulă cu formula care definește poziția centrului de greutate, vedem că sînt absolut identice. De aici rezultă direct că centrul de greutate al proiectilului și tunului va rămîne tot timpul în punctul unde se afla inițial.

Cu alte cuvinte, am ajuns la un rezultat foarte interesant: după tragere, centrul de greutate al tunului și proiectilului rămîne în stare de repaus.

Această concluzie este întotdeauna adevărată: dacă centrul de greutate a două corpuri era inițial în stare de repaus, interacțiunea lor — orice caracter ar avea ea — nu poate modifica poziția centrului de greutate. De aceea, nu ne putem ridica singuri trăgîndu-ne de păr și nu ne putem trage spre Lună prin metoda scriitorului francez Cyrano de Bergerac, care propunea (firește, în glumă) să se ia, în acest scop, într-o mînă o bucată de fier, iar cu cealaltă mînă să se arunce în sus un magnet care să atragă acest fier.

Din punct de vedere al altui sîstem inerțial, centrul de greutate în repaus se mișcă cu viteză uniformă. Așadar, centrul de greutate

se află fie în stare de repaus, fie în stare de mișcare uniformă și rectilinie.

Cele menționate despre centrul de greutate a două corpuri este adevărat și pentru un grup de mai multe corpuri; desigur, cînd este vorba de un grup izolat de corpuri, căci așa convenim întotdeauna cînd se aplică legea conservării impulsului.

Așadar, fiecare grup de corpuri care interacționează are un punct care se găsește în stare de repaus sau se deplasează uniform, iar acest punct este centrul lor de greutate.

Pentru a sublinia noua proprietate a acestui punct, i se mai dă o denumire: centru de inerție (sau centru de masă) căci, de exemplu, despre greutatea sistemului solar (și deci despre centrul lui de greutate) nu poate fi vorba decît în sens convențional.

Oricum s-ar mișca corpurile care formează un grup închis, centrul lor de inerție (de greutate) se va găsi în stare de repaus sau, în alt sistem de referință, se va mișca în virtutea inerției.

Momentul cinetic (sau de rotație)

Acum vom face cunoștință cu încă o mărime mecanică, care permite să se formuleze o nouă lege importantă a mișcării.

Această mărime se numește moment cinetic sau moment de rotație sau moment al impulsului sau moment al cantității de mișcare. Înseși aceste denumiri sugerează că este vorba de o mărime oarecum asemănătoare cu momentul unei forțe.

Momentul cinetic, ca și momentul unei forțe, necesită indicarea

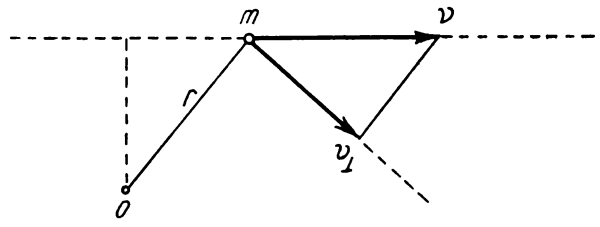


FIG. 61

punctului în raport cu care se calculează momentul. Pentru a se determina momentul cinetic în raport cu un punct oarecare, trebuie să se construiască vectorul impulsului (care are același suport ca și vectorul vitezei) și să se coboare din acel punct o perpendiculară

pe direcția sa (fig. 61). Produsul dintre impulsul mv și brațul d este chiar momentul cinetic, pe care-l vom nota cu litera p:

$$p = mvd.$$

Dacă un corp se mișcă liber, viteza lui nu variază; tot invariabil rămîne și brațul în raport cu un punct oarecare, deoarece mișcarea are loc pe o linie dreaptă. Așadar, și momentul cinetic, într-o astfel de mișcare, este constant.

Ca și în cazul momentului unei forțe, se poate scrie pentru momentul cinetic și altă formulă. Să unim printr-o rază poziția corpului cu punctul în raport cu care ne interesează momentul (fig. 61). Să construim și proiecția vitezei pe o direcție perpendiculară pe rază. Din triunghiurile asemenea construite în figură rezultă că $\frac{v}{v_1} = \frac{r}{d}$. Așadar, $vd = v_1 r$, iar formula momentului cinetic poate fi scrisă și sub forma următoare: $p = mv_1 r$.

În cazul mișcării libere, după cum am mai spus, momentul cinetic rămîne constant. Dar dacă asupra corpului acționează o forță? Calculul arată că variația momentului cinetic într-o secundă este egală cu momentul forței.

Această lege se poate extinde fără dificultate și la un sistem de corpuri. Dacă se adună variațiile momentelor cinetice ale tuturor corpurilor care fac parte din sistem, suma lor va fi egală cu suma momentelor forțelor care acționează asupra corpului. Așadar, pentru un grup de corpuri este valabilă propoziția: variația momentului cinetic total în unitatea de timp este egală cu suma momentelor tuturor forțelor.

Legea conservării momentului cinetic

Dacă se leagă două pietre cu o sfoară și se aruncă cu putere una dintre ele, a doua piatră va urma mișcarea primei, care o trage de sfoară după ea. O piatră o va lua înaintea celeilalte, iar deplasarea înainte va fi însoțită de o rotație. Să uităm de cîmpul de atracție al Pămîntului și să presupunem că pietrele se aruncă în spațiul interplanetar.

Forțele care acționează asupra pietrelor sînt egale una cu alta și dirijate în sensuri opuse de-a lungul sforii (căci ele sînt forțe de acțiune și reacțiune). Dar atunci și brațele ambelor forțe în raport cu un punct oarecare sînt identice. Brațele egale și forțele egale,

dar opuse ca sens, dau momente egale și de semn contrar ale forțelor.

Momentul rezultant al forțelor va fi egal cu zero. De aici rezultă însă că va fi egală cu zero și variația momentului cinetic, adică momentul cinetic al unui astfel de sistem rămîne constant.

Sfoara care leagă pietrele ne-a servit pentru claritatea expunerii. Legea conservării momentului cinetic este valabilă pentru orice pereche de corpuri care interacționează, de orice natură ar fi această interacțiune.

Dar nu numai pentru perechi de corpuri. Dacă se studiază un sistem închis de corpuri, forțele care acționează între acestea pot fi întotdeauna împărțite într-un număr egal de forțe de acțiune și de reacțiune ale căror momente se vor anihila două cîte două.

Legea conservării momentului cinetic total este universală și adevărată pentru orice sistem închis de corpuri.

Dacă un corp se rotește în jurul unei axe, momentul lui cinetic va fi

$$p = mvr,$$

în care m este masa, v viteza și r distanța față de axă. Exprimînd viteza prin numărul n de rotații pe secundă, avem:

$$v = 2\pi nr \text{ și } p = 2\pi mnr^2,$$

adică momentul cinetic este proporțional cu pătratul distanței față de axă.

Așezați-vă pe un taburet care se poate învîrti. Luați în mîini niște greutăți mari de cîntar, întindeți mîinile cît puteți în lături și rugați pe cineva să vă învîrtească încet. Apoi, cu o mișcare rapidă, strîngeți mîinile la piept — veți începe pe neașteptate să vă învîrtiți mai repede. Întinzînd mîinile din nou în lături mișcarea se va încetini, strîngînd mîinile la piept, mișcarea se va accelera. Pînă ce taburetul va înceta să se învîrtească din cauza frecării, veți putea să modificați de cîteva ori viteza voastră de rotație.

Care este explicația?

Dacă numărul de rotații ar rămîne constant, momentul cinetic s-ar micșora cînd greutățile se apropie de axă. Pentru a „compensa" această micșorare, viteza de rotație se mărește.

Legea conservării momentului cinetic este utilizată cu succes de acrobați. Cum execută un acrobat saltul mortal, adică darea peste cap în aer? În primul rînd, desigur, intervine împingerea în trambulină sau în mîinile partenerului. În timpul acestei împingeri corpul este înclinat înainte și greutatea, împreună cu forța de împingere, creează un moment al forței. Forța de împingere produce

mișcarea înainte, iar momentul forței dă naștere rotației. Dar această rotație este lentă și nu produce impresie asupra spectatorilor. Acrobatul strînge, deci coatele. „Adunîndu-și corpul" cît mai aproape de axa de rotație, acrobatul mărește considerabil viteza de rotație și se dă repede peste cap. Aceasta este mecanica saltului mortal.

Pe același principiu sînt bazate mișcările balerinei care face piruete repezi una după alta. De obicei, partenerul balerinei îi imprimă momentul cinetic inițial. În această clipă, corpul dansatoarei este aplecat; începe o rotire lentă, apoi o mișcare grațioasă și repede — balerina își îndreaptă corpul. Acum punctele corpului se găsesc mai aproape de axa de rotație, iar din cauza conservării momentului cinetic, viteza se mărește foarte mult.

Momentul cinetic ca vector

Pînă acum a fost vorba de valoarea momentului cinetic. Dar momentul de rotație are proprietățile unei mărimi vectoriale.

Să considerăm rotația unui punct în raport cu un „centru" oarecare. În fig. 62 sînt reprezentate două poziții apropiate ale punctului. Mișcarea respectivă se caracterizează printr-un moment cinetic și prin planul în care ea se produce. Planul mișcării este hașurat în figură — el este suprafața parcursă de raza dusă din „centru" pînă la punctul în mișcare.

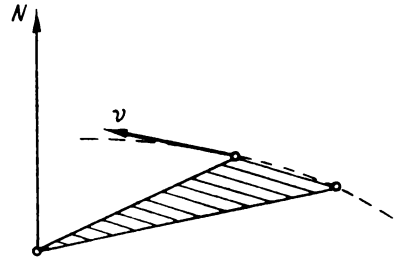


FIG. 62

Informațiile despre direcția planului mișcării și despre valoarea momentului cinetic pot fi considerate împreună. În acest scop servește vectorul momentului dirijat în lungul normalei la planul mișcării și numeric egal cu valoarea absolută a momentului. Aceasta însă nu este totul — mai trebuie să se țină seamă de sensul mișcării în plan, căci corpul se poate roti în jurul centrului, atît în sensul acelor ceasornicului, cît și în sens contrar.

Se obișnuiește să se figureze vectorul momentului cinetic în așa fel, încît, privind de-a lungul vectorului în sensul săgeții, să vedem rotația punctului în sensul de mișcare al acelor ceasornicului. Se

poate spune și altfel: sensul vectorului momentului cinetic este legat de sensul rotației punctului, după cum sensul unui tirbușon care se înșurubează într-un dop este legat de sensul mișcării mînerului său.

Așadar, dacă se cunoaște vectorul momentului cinetic, ne putem da seama de valoarea momentului, de poziția în spațiu a planului mișcării și de sensul de rotație în raport cu „centrul".

Dacă mișcarea are loc în același plan, dar brațul și viteza variază, vectorul momentului cinetic își menține direcția în spațiu, dar variază ca lungime, iar în cazul unei mișcări arbitrare, vectorul momentului cinetic variază atît ca mărime, cît și ca direcție.

Se poate arăta că această împreunare într-una singură a noțiunii de direcție a planului mișcării și de valoare a momentului cinetic servește numai în scopul economisirii cuvintelor. În realitate, însă, cînd avem de-a face cu un sistem de corpuri care nu se mișcă în același plan, vom obține legea conservării momentului numai atunci cînd vom aduna momentele cinetice ca vectori.

Acest lucru arată că atribuirea caracterului de vector momentului cinetic are o semnificație profundă.

Momentul cinetic se determină întotdeauna în raport cu un „centru" ales convențional. Este natural că valoarea sa, în general vorbind, depinde de alegerea acestui punct. Se poate însă arăta că, dacă sistemul de corpuri considerat, luat ca un tot, se găsește în stare de repaus (adică impulsul lui total este egal cu zero), atunci vectorul momentului cinetic nu depinde de alegerea „centrului". Acest moment cinetic se poate numi moment cinetic intern al sistemului de corpuri.

Legea conservării vectorului momentului cinetic este a treia și ultima lege a conservării din mecanică. Cînd vorbim însă de trei legi ale conservării, nu ne exprimăm absolut exact, căci impulsul și momentul cinetic sînt mărimi vectoriale, iar legea conservării unei mărimi vectoriale spune că rămîne constantă nu numai valoarea mărimii, ci și direcția și sensul ei sau, cu alte cuvinte, rămîn constante cele trei componente ale vectorului pe trei direcții în spațiu perpendiculare una pe alta. Energia este o mărime scalară (adică o mărime caracterizată numai prin valoare), impulsul este o mărime vectorială, iar momentul cinetic este tot o mărime vectorială. De aceea, ar fi mai corect să se spună că în mecanică există șapte legi ale conservării.

Încercați să puneți o farfurie cu fundul pe un baston subțire și s-o țineți în poziție de echilibru. Nu veți reuși. Acest truc este însă un număr favorit al jonglerilor chinezi. Ei izbutesc să realizeze această performanță lucrînd în același timp cu mai multe bastonașe. Jonglerul nu caută de loc să țină bețele subțiri în poziție verticală. Pare o minune că farfuriile, rezemîndu-se puțin pe capetele beților înclinate aproape orizontal nu cad, ci par că plutesc în aer.

Dacă aveți ocazia să observați de aproape cum lucrează jonglerii, fiți atenți la un lucru foarte important: jonglerul învîrtește farfuriile în așa fel, încît ele să se rotească repede în planul lor.

Jonglînd cu măciuci, cu inele, cu pălării, — artistul le imprimă în toate cazurile o mișcare de rotație. Numai în acest caz obiectele se reîntorc în mîinile lui în poziția inițială.

Care este cauza acestei stabilități a rotației? Ea este în legătură cu legea conservării momentului, căci atunci cînd se modifică direcția axei de rotație, se modifică și direcția vectorului momentului cinetic. După cum pentru schimbarea direcției vitezei este necesară o forță, tot așa pentru schimbarea planului de rotație este necesar momentul unei forțe, și anume un moment cu atît mai mare, cu cît corpul se rotește mai repede.

Tendința unui corp care se rotește repede de a-și menține neschimbată direcția axei de rotație poate fi observată în multe cazuri asemănătoare cu cel menționat. Astfel, de exemplu, o sfîrlează care se învîrtește, nu se răstoarnă, chiar atunci cînd axa ei este înclinată.

Încercați să răsturnați cu mîna o sfîrlează care se învîrtește și veți vedea că nu este atît de ușor.

Stabilitatea unui corp în rotație este folosită în artilerie. Ați auzit, probabil, că în interiorul țevii tunurilor se fac ghinturi în formă de spirală. Proiectilul care iese din tun se rotește în jurul axei sale și din această cauză „nu se dă peste cap" în aer. Un tun cu țeava ghintuită trage cu o precizie incomparabil mai mare și are o bătaie mai lungă decît unul neghintuit.

Aviatorul și navigatorul pe mare au nevoie să știe întotdeauna care este poziția reală a verticalei terestre în raport cu poziția avionului sau a vasului la un moment dat. Firul cu plumb nu se poate folosi în acest scop, deoarece în cazul mișcării accelerate, firul cu plumb se înclină. De aceea se întrebuințează o sfîrlează sau giroscop, de construcție specială care se învîrtește repede și care se numește orizont artificial. Dacă se așază axa sa de rotație pe

verticala terestră, el rămîne în această poziție, indiferent cum și-ar schimba avionul poziția în spațiu.

Pe ce stă însă giroscopul? Dacă se găsește pe un suport care se rotește împreună cu avionul, cum poate axa lui de rotație să-și păstreze direcția?

Ca suport servește un dispozitiv de tipul așa-numitei suspensii cardanice (fig. 63). În acest dispozitiv, care are frecări minime, giroscopul se poate comporta ca și cum ar fi suspendat în aer.

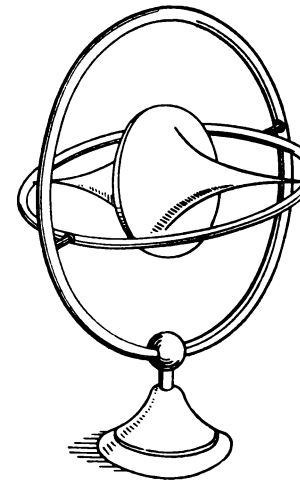


FIG. 63

Cu ajutorul giroscoapelor în rotație se poate menține, în mod automat, direcția de mers a unei torpile sau a unui avion. Acest rezultat se obține cu ajutorul unor mecanisme care „urmăresc" devierea direcției axei torpilei de la direcția axei de rotație a giroscopului.

Pe folosirea unui giroscop în rotație se bazează construcția unor aparate importante cum este busola giroscopică (sau compasul giroscopic). Se poate dovedi că, sub influența forței Coriolis și a forțelor de frecare, axa giroscopului se așază în cele din urmă paralel cu axa Pămîntului și deci indică nordul.

Busolele giroscopice se întrebuințează pe scară largă în marină. Partea lor principală este un motor cu un volant greu, care efectuează pînă la 25 000 rot/min.

Cu toate dificultățile de a înlătura diferitele piedici, în particular din cauza balansului navei, busolele giroscopice au un mare avantaj față de busolele magnetice. Defectul acestora din urmă este denaturarea indicațiilor din cauza influenței obiectelor de fier și a instalațiilor electrice de pe navă.

Arborele flexibil

Arborii turbinelor moderne cu aburi sînt piese importante ale acestor mașini. Fabricarea lor (ajung pînă la 10 m lungime și 0,5 m diametru) este o problemă tehnologică complicată. Arborele

unei turbine puternice poate suporta o sarcină de circa 200 t și se poate roti cu o viteză de 3 000 rot/min.

La prima vedere, s-ar părea că un astfel de arbore trebuie să fie excepțional de solid și de rezistent. Lucrurile nu stau însă așa. La zeci de mii de rotații pe minut, un arbore fixat rigid și care nu se poate încovoia se rupe inevitabil, oricît de mare ar fi rezistența lui.

Este ușor de înțeles de ce arborii rigizi nu sînt utilizabili în acest caz. Oricît de precis ar fi lucrat constructorii de mașini, ei nu pot evita chiar și cele mai mici asimetrii ale rotorului turbinei. În timpul rotirii unui astfel de rotor iau naștere forțe centrifuge enorme; reamintim că valoarea lor este proporțională cu pătratul vitezei de rotație. Dacă aceste forțe nu sînt echilibrate cu mare precizie, arborele începe să „bată" în lagăre (căci forțele centrifuge neechilibrate „se rotesc" împreună cu mașina), le rup și distrug turbina.

Acest fenomen a pus, la timpul lui, dificultăți de neînvins în calea măririi vitezei de rotație la turbine. Ieșirea din această situație a fost găsită la limita dintre secolul trecut și cel prezent. În tehnica construcției turbinelor s-au introdus atunci arborii flexibili.

Pentru a se înțelege în ce constă ideea acestei invenții remarcabile, trebuie să calculăm acțiunea totală a forțelor centrifuge. Cum se pot însă aduna aceste forțe? Se știe că rezultanta tuturor forțelor centrifuge este aplicată în centrul de greutate al arborelui și are o comportare ca și cum toată masa rotorului turbinei ar fi concentrată în centrul de greutate.

Să notăm cu a distanța de la centrul de greutate al rotorului turbinei pînă la axă, distanță diferită de zero, din cauza micilor asimetrii ale rotorului. În timpul rotației, asupra arborelui vor acționa forțele centrifuge, iar arborele se va încovoia. Să notăm cu l deformația arborelui și să-i calculăm valoarea. Cunoaștem formula forței centrifuge (vezi p. 57); această forță este proporțională cu distanța de la centrul de greutate pînă la axa de rotație, care acum este $a + l$ și este egală cu $4\pi^2n^2M(a + l)$, în care n este numărul de rotații pe minut, iar M este masa pieselor în rotație. Forța centrifugă este echilibrată de forța elastică, care este proporțională cu mărimea deformației arborelui și va fi egală cu kl; coeficientul k caracterizează rigiditatea arborelui. Așadar,

$$kl = 4\pi^2n^2M(a + l),$$

de unde

$$l = a \frac{1}{\frac{k}{4\pi^2 n^2 M} - 1}.$$

Judecînd după această formulă, pentru un arbore flexibil, turațiile mari nu sînt periculoase. La valori foarte mari (chiar infinit de mari) ale lui n, săgeata l a arborelui nu crește la infinit. Valoarea lui $\frac{k}{4\pi^2 n^2 M}$, care figurează în ultima formulă, devine egală cu zero, iar săgeata l a arborelui devine egală cu valoarea asimetriei însă luată cu semn contrar.

Acest rezultat al calculului arată că la turații mari, un rotor asimetric, în loc să rupă arborele, îl încovoaie în așa fel, încît să anihileze influența asimetriei. Arborele care se încovoaie centrează părțile în rotație și, prin încovoierea sa, mută centrul de greutate pe axa de rotație și astfel reduce la zero efectul forței centrifuge.

Flexibilitatea arborelui nu numai că nu este un defect, ci, dimpotrivă, este o condiție necesară de stabilitate, căci pentru stabilitate, arborele trebuie să se încovoaie cu cantitatea a și să nu se rupă.

Un cititor atent poate observa o eroare în raționamentele făcute. Dacă un arbore, care „centrează" la turații mari, se deplasează din poziția de echilibru pe care am găsit-o și dacă se consideră numai forța centrifugă și cea elastică, este ușor de văzut că echilibrul lui este nestabil. S-a constatat însă că forțele Coriolis salvează situația și fac ca acest echilibru să fie perfect stabil.

O turbină începe să se rotească încet. La început, cînd n este foarte mic, raportul $\frac{k}{4\pi^2 n^2 M}$ va avea o valoare mare. Atîta timp cît acest raport, cînd turația se mărește, va fi mai mare decît unitatea, valoarea săgeții arborelui va avea același semn ca valoarea deplasării inițiale a centrului de greutate al rotorului. Așadar, în aceste momente inițiale ale mișcării, arborele care se încovoaie nu centrează rotorul, ci, dimpotrivă, prin încovoierea lui mărește deplasarea totală a centrului de greutate și deci și forța centrifugă. Pe măsură ce se mărește turația n $\left(\text{dar se menține condiția } \frac{k}{4\pi^2 n^2 M} > 1\right)$, deformația crește și, în sfîrșit, se ajunge la momentul critic. Pentru $\frac{k}{4\pi^2 n^2 M} = 1$, numitorul formulei săgeții l devine egal cu zero și deci săgeata arborelui devine formal infinit de mare. La această

viteză de rotație, arborele se rupe. La pornirea turbinei, acest moment trebuie să fie depășit repede și este necesar să se sară peste turația critică și să se treacă la o viteză mult mai mică a turbinei, la care începe fenomenul de autocentrare descris mai înainte.

Dar ce fel de moment critic este acesta? Putem transcrie această condiție sub forma următoare:

$$4\pi^2 \frac{M}{k} = \frac{1}{n^2}$$

sau, înlocuind turația cu perioada de rotație, cu ajutorul relației $n = \frac{1}{T}$, și extrăgînd rădăcina, sub forma următoare:

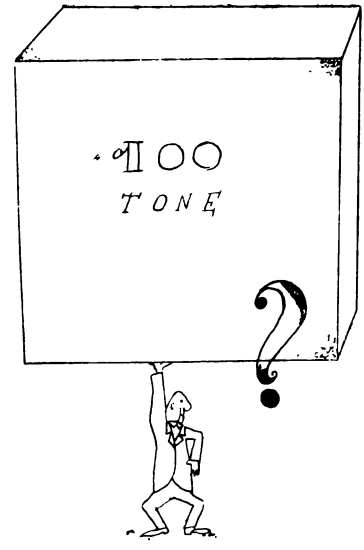
$$T = 2\pi \sqrt{\frac{M}{k}}.$$

Ce fel de mărime am obținut în membrul al doilea al acestei egalități? Formula pare foarte cunoscută. Referindu-ne la pag. 104, vedem că în membrul din dreapta figurează aici perioada proprie de oscilație a rotorului pe arbore. Perioada $2\pi \sqrt{\frac{M}{k}}$ este perioada cu care ar oscila rotorul unei turbine de masă M fixată pe un arbore cu rigiditatea k, dacă am deplasa rotorul în lături, pentru ca să oscileze de la sine.

Așadar, momentul periculos este acela cînd perioada de rotație a rotorului turbinei coincide cu perioada proprie de oscilație a sistemului turbină-arbore. Existența turației critice se datorește fenomenului de rezonanță.

VII

Gravitația



Pe ce se sprijină Pământul?

În vremurile de demult, la această întrebare se dădea un răspuns simplu: pe trei balene. Ce-i drept, nimeni nu putea lămuri pe ce ședeau balenele, dar aceasta nu-i tulbura pe strămoșii noștri naivi.

Concepțiile corecte despre natura mișcării Pământului, despre forma acestuia și despre multe legi ale mișcării planetelor în jurul Soarelui au apărut cu mult înainte de a se fi dat răspunsul referitor la cauzele mișcării planetelor.

Dar, de fapt, pe ce se „sprijină" Pământul și celelalte planete? Pentru ce se mișcă ele în jurul Soarelui pe anumite orbite și nu fug de el?

Multă vreme nu s-a putut da răspuns la aceste întrebări, iar biserica, luptînd contra sistemului cosmogonic al lui Copernic, s-a folosit de acest fapt pentru a nega mișcarea Pământului.

Descoperirea adevărului o datorăm marelui savant englez Isaac Newton (1643—1727).

O anecdotă istorică celebră spune că, stînd în grădină sub un măr și observînd gînditor cum la fiecare suflare mai tare de vînt cade cîte un măr, Newton a ajuns la ideea că există anumite forțe de atracție între toate corpurile din univers.

În urma descoperirii lui Newton s-a stabilit că o mulțime de fenomene în aparență diferite — căderea liberă a corpurilor pe Pămînt, mișcările vizibile ale Lunii și Soarelui, mareele etc. — sînt manifestări ale uneia și aceleiași legi a naturii: legea atracției universale.

Între toate corpurile din univers, spune această lege, fie că este vorbă de grăunțe de nisip, de boabe de mazăre, de pietre sau de planete, acționează forțe de atracție reciprocă.

La prima vedere, această lege pare falsă: n-am observat niciodată că obiectele care ne înconjură se atrag unul pe altul. Pămîntul atrage orice corp și de aceasta nimeni nu se îndoiește. Dar poate că aceasta este o însușire specială a Pămîntului? Nu, nu este. Atracția dintre două obiecte oarecare este mică și numai de aceea nu se observă imediat. Cu toate acestea, prin experiențe speciale, ea poate fi scoasă la iveală. Dar despre aceasta vom vorbi mai tîrziu.

Existența atracției universale, și numai ea, explică stabilitatea sistemului solar, mișcarea planetelor și a celorlalte corpuri cerești.

Luna este menținută pe orbită de forțele de atracție ale Pămîntului, iar Pămîntul se menține pe traiectoria sa datorită forțelor de atracție ale Soarelui.

Mișcarea circulară a corpurilor cerești se produce ca și mișcarea circulară a unei pietre învîrtite cu o sfoară.

Forțele de atracție universală sînt „frînghiile" invizibile care silesc corpurile cerești să se miște pe anumite traiectorii.

Afirmația că există forțe de atracție universală nu însemna prea mare lucru. Newton a găsit legea acestei atracții și a arătat de ce depind forțele respective.

Legea atracției universale

Prima întrebare pe care și-a pus-o Newton a fost următoarea: prin ce se deosebește accelerația Lunii de accelerația unui măr? Cu alte cuvinte, care este diferența dintre accelerația g pe care globul pămîntesc o imprimă corpurilor în cădere liberă la suprafața sa, adică la distanța r de centru, și accelerația la distanța R la care se găsește Luna față de Pămînt?

Pentru a calcula această accelerație v^2/R, trebuie să se cunoască viteza cu care se mișcă Luna și distanța de la ea la Pămînt. Ele erau cunoscute de Newton. Accelerația Lunii era egală aproximativ cu 0,27 cm/s^2. Această valoare este de circa 3600 de ori mai mică decît valoarea lui $g = 980$ cm/s^2.

Așadar, accelerația produsă de Pămînt scade cu creșterea distanței față de centrul Pămîntului. Dar cît de repede? Distanța este egală cu 60 de raze pămîntești. Dar 3600 este pătratul lui 60. Distanța mărindu-se de 60 ori, accelerația s-a micșorat de 60^2 ori.

Newton a tras concluzia că accelerația și deci și forța de atracție variază invers proporțional cu pătratul distanței. Mai departe, știm că forța care acționează asupra unui corp în cîmpul de atracție este proporțională cu masa lui. De aceea, primul corp atrage pe al doilea cu o forță proporțională cu masa celui de-al doilea corp, iar al doilea corp atrage pe primul cu o forță proporțională cu masa primului corp.

Este vorba de două forțe identic egale, de forța de acțiune și de forța de reacțiune. Așadar, forța de atracție reciprocă trebuie să fie proporțională atît cu masa primului corp, cît și cu masa celui de-al doilea, adică cu produsul maselor. Deci

$$F = k \frac{Mm}{r^2}.$$

Aceasta este tocmai legea atracției universale. Newton presupunea că această lege este valabilă pentru orice pereche de corpuri.

Acum această ipoteză îndrăzneață a fost pe deplin demonstrată. Așadar, forța de atracție dintre două corpuri este direct proporțională cu produsul maselor lor și invers proporțională cu pătratul distanței dintre ele.

Dar ce este k care a intrat în formulă? Este un coeficient de proporționalitate. Nu se poate considera acest coeficient egal cu unitatea, cum am făcut pînă acum de mai multe ori? Nu, nu se poate, căci am convenit să măsurăm masa în grame, distanța în centimetri și forța în dine. Valoarea lui k este egală cu forța de atracție dintre două mase de 1 g care se găsesc la distanța de 1 cm, și ea trebuie să fie măsurată.

Pentru a afla pe k, nu este, bineînțeles, neapărat necesar să se măsoare forțele de atracție ale unor mase de un gram. Pe noi ne interesează să facem măsurarea în cazul unor corpuri masive, căci atunci forța va fi mai mare.

Dacă se determină masa a două corpuri, dacă se cunoaște distanța dintre ele și se măsoară forța de atracție, k se va găsi printr-un calcul simplu.

Astfel de experiențe s-au făcut de numeroase ori. Ele au arătat că valoarea lui k este întotdeauna aceeași, indiferent de materialul corpurilor care se atrag și de proprietățile mediului în care se găsesc. k se numește constanta atracției universale. Ea este egală cu

$$k = 6{,}67 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^3/\text{g} \cdot \text{s}^2.$$

Schema uneia din experiențele de măsurare a lui k este dată în fig. 64. La capetele pîrghiei unei balanțe sînt suspendate două bile de aceeași masă. Una dintre ele se găsește deasupra unei plăci de plumb, iar cealaltă dedesubtul acesteia. Plumbul (pentru experiență s-au luat 100 t de plumb) mărește prin atracția lui greutatea bilei din dreapta și micșorează greutatea celei din stînga. Bila din dreapta cîntărește mai mult decît cea din stînga. Pe baza înclinării pîrghiei balanței se calculează valoarea lui k.

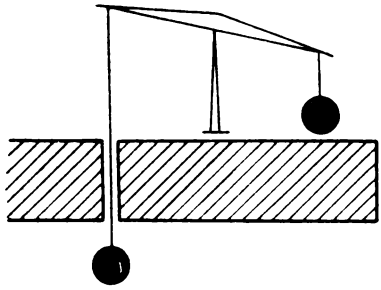


FIG. 64

Prin valoarea extrem de mică a lui k se explică dificultatea de a detecta forțele de atracție dintre două corpuri.

Două corpuri metalice de cîte 1 000 kg se atrag unul pe altul cu o forță infimă, egală doar cu 6,7 dyn, adică 0,007 g, dacă aceste corpuri se găsesc, să zicem, la o distanță de 1 m unul de altul.

Dar ce mari sînt forțele de atracție dintre corpurile cerești! Între Lună și Pămînt

$$F = 6{,}7 \cdot 10^{-8} \frac{6 \cdot 10^{27} \cdot 0{,}74 \cdot 10^{26}}{(38 \cdot 10^{9})^2} = 2 \cdot 10^{25} \text{ dyn} \approx 2 \cdot 10^{10} \text{ kgf};$$

între Pămînt și Soare

$$F = 6{,}7 \cdot 10^{-8} \frac{2 \cdot 10^{33} \cdot 6 \cdot 10^{27}}{(15 \cdot 10^{12})^2} = 3{,}6 \cdot 10^{27} \text{ dyn} \approx 3{,}6 \cdot 10^{21} \text{ kgf}!$$

Cîntărirea Pămîntului

Înainte de a începe să folosim legea atracției universale, este necesar să ne îndreptăm atenția asupra unui amănunt important.

Am calculat mai înainte forța de atracție dintre două corpuri care se găsesc la distanță de 1 m unul de altul. Dar dacă aceste corpuri se găsesc la distanță de 1 cm? Ce trebuie să se substituie în formulă — distanța dintre suprafețele corpurilor sau distanța dintre centrele de greutate, ori altceva?

Legea atracției universale, $F = k \frac{m_1 m_2}{2}$, se poate aplica cu toată rigurozitatea atunci cînd nu încape o astfel de îndoială. Distanța dintre corpuri trebuie să fie mult mai mare decît dimensiunile corpurilor, adică trebuie să avem dreptul să considerăm corpurile ca niște puncte. Dar cum se poate aplica legea la două corpuri apropiate? În principiu, este simplu: trebuie să descompunem, în gînd, corpurile în bucățele foarte mici și să calculăm pentru fiecare pereche de bucățele forța F, iar după aceea să adunăm (vectorial) toate forțele.

Principial pare simplu, dar în practică este destul de complicat.

Natura ne-a venit însă în ajutor. Calculul arată că dacă particulele unui corp interacționează cu o forță proporțională cu $\frac{1}{r^2}$, corpurile sferice au însușirea de a se atrage ca niște puncte situate în centrele sferelor. Pentru două sfere apropiate, formula $F = k \frac{m_1 m_2}{r^2}$ este tot atît de justă ca pentru cele depărtate, dacă r este distanța dintre centrele sferelor. Ne-am servit de această regulă mai înainte, cînd am calculat accelerația la suprafața Pămîntului.

Acum avem dreptul să folosim formula atracției universale pentru a calcula forța de atracție a corpurilor de către Pămînt. Prin r trebuie să înțelegem distanța de la centrul Pămîntului pînă la corpul respectiv.

Fie M masa și R raza Pămîntului. Atunci forța de atracție a unui corp de masă m la suprafața Pămîntului va fi

$$F = k \frac{M}{R^2} \cdot m.$$

Dar aceasta este tocmai greutatea corpului, pe care o exprimăm întotdeauna prin mg. Deci accelerația forței gravitaționale este

$$g = k \frac{M}{R^2}.$$

Acum putem spune cum s-a „cîntărit" Pămîntul. g, k și R sînt mărimi cunoscute și deci se poate calcula cu această formulă masa Pămîntului. În același mod se poate „cîntări" și Soarele.

Se poate, oare, numi acest calcul cîntărire? Desigur că da; măsurările indirecte joacă în fizică un rol tot atît de mare ca și cele directe.

Vom rezolva acum o problemă interesantă.

În planurile de creare a unui sistem mondial de televiziune joacă un rol foarte important crearea unui satelit „suspendat",

adică a unui satelit care să stea tot timpul în același punct deasupra suprafeței Pământului. Oare un astfel de satelit va fi supus unor forțe mari de frecare? Depinde de cît de departe de Pămînt va trebui să se rotească.

Satelitul „suspendat" trebuie să se rotească cu perioada T egală cu 24 h. Dacă r este distanța de la satelit la centrul Pământului, atunci viteza sa va fi $v = \frac{2\pi r}{T}$, iar accelerația va fi $\frac{v^2}{r} = \frac{4\pi^2}{F^2} r$. Pe de altă parte, această accelerație, a cărei sursă este atracția pămîntească, este egală cu $k \frac{M}{r^2} = g \frac{R^2}{r^2}$. Egalînd valorile accelerației, obținem:

$$g \frac{R^2}{r^2} = \frac{4\pi^2 r}{T^2}, \quad \text{adică} \quad r^3 = \frac{g R^2 T^2}{4\pi^2}.$$

Înlocuind cu valorile rotunjite $g = 10$ m/s^2, $R = 6 \cdot 10^6$ m și $T = 9 \cdot 10^4$ s, obținem: $r^3 = 7 \cdot 10^{22}$, adică $r \approx 4 \cdot 10^7$ m $= 40\,000$ km. La această înălțime nu există frecare atmosferică, iar satelitul „suspendat", dacă va putea fi lansat, nu-și va încetini „goana sa imobilă".

Măsurarea lui g în slujba explorării

Nu e vorba de recunoașterea terenului inamicului în timp de război. Acolo cunoașterea accelerației gravitației nu servește la nimic. Este vorba de explorarea geologică, al cărei scop este să se găsească zăcăminte de minerale utile în subsol, fără a se săpa gropi sau puțuri de mină.

Există mai multe metode de determinare precisă a accelerației gravitației. Se poate găsi g prin simpla cîntărire a unei greutăți standard la o balanță cu resort. Balanțele geologice trebuie să fie extrem de sensibile — arcul lor trebuie să-și modifice tensiunea cînd se adaugă sarcini mai mici decît a milioana parte dintr-un gram. Rezultate excelente dau balanțele de torsiune cu fir de cuarț. În principiu, construcția lor este simplă. De un fir de cuarț întins orizontal este sudată o pîrghie, care prin greutatea ei face ca firul să se răsucească puțin (fig. 65).

În același scop se folosește și un pendul. Pînă nu demult, metodele de măsurare a lui g cu pendulul erau singurele utilizate și numai în ultimii 10—20 ani ele au început să fie înlocuite prin

metode mai comode și precise bazate pe cîntărire cu balanța. În orice caz, măsurînd perioada de oscilație a pendulului, se poate găsi, cu formula $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$, valoarea lui g cu destulă precizie.

Măsurînd cu același instrument valoarea lui g în diferite locuri,

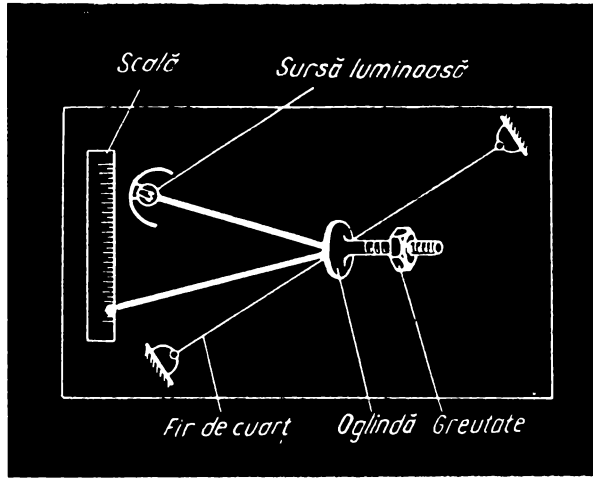


FIG. 65

se pot aprecia variațiile relative ale forței gravitaționale cu o precizie pînă la o milionime.

Măsurînd valoarea lui g într-un punct oarecare al suprafeței Pămîntului, experimentatorul se poate întîmpla să ajungă la rezultatul că valoarea ei prezintă o anomalie, că e mai mică sau mai mare decît cea normală.

Dar care este valoarea normală a lui g?

Valoarea accelerației gravitației la suprafața Pămîntului are două variații, după anumite legi, care au fost studiate demult și sînt binecunoscute de cercetători.

Accelerația gravitației, g, se micșorează după o anumită lege, cînd se trece de la un pol la ecuator. Am vorbit despre aceasta mai înainte. Reamintim numai că această variație are loc din două cauze: în primul rînd, Pămîntul nu este o sferă, prin urmare un corp care se găsește la pol este mai aproape de centrul Pămîntului; în al doilea rînd, pe măsură ce ne apropiem de ecuator, forța gravitațională este slăbită din ce în ce mai mult de forța centrifugă.

A doua variație a lui g după o anumită lege este scăderea lui cu creșterea înălțimii. Cu cît distanța față de centrul Pămîntului

este mai mare, cu atît g este mai mic, în conformitate cu formula $g = k\frac{M}{(R+h)^2}$, în care R este raza Pămîntului, iar h înălțimea deasupra nivelului mării.

Așadar, la aceeași latitudine și la aceeași înălțime deasupra nivelului mării, accelerația gravitației trebuie să fie identică.

Măsuri precise arată că de foarte multe ori se constată abateri de la această normă—anomalii ale gravitației. Cauza acestor anomalii este neomogenitatea distribuției masei în apropierea punctului în care se face măsurarea.

După cum am explicat, forța de atracție din partea unui corp mare poate fi concepută ca suma forțelor care acționează din partea diferitelor particule ale corpului. Atracția pendulului de către Pămînt este rezultatul acțiunii tuturor particulelor Pămîntului asupra pendulului. Este clar însă că particulele apropiate contribuie cel mai mult la forța totală, căci atracția este invers proporțională cu pătratul distanței.

Dacă în apropiere de punctul unde se face măsurarea sînt concentrate mase mari, g va fi mai mare decît normal, iar în caz contrar, g va fi mai mic decît normal.

Dacă, de exemplu, se măsoară g pe vîrful unui munte sau într-un avion care zboară deasupra mării la o înălțime egală cu a muntelui, în primul caz va obține o valoare mai mare. De pildă, pe vîrful muntelui Etna din Sicilia, valoarea lui g este cu 0,292 cm/s^2 mai mare decît cea normală. De asemenea sînt mai mari decît normal valorile lui g pe insulele izolate din ocean. Este limpede că, în ambele cazuri, creșterea lui g se explică prin concentrarea unor mase suplimentare în punctul în care se face măsurarea.

Nu numai valoarea lui g, ci și direcția forței gravitaționale se poate abate de la cea normală. Dacă se suspendă o greutate de un fir, acest fir întins arată verticala locului respectiv. Această verticală poate devia de la cea normală. Direcția „normală" a verticalei este cunoscută de geologi din hărți speciale, pe care, după datele asupra valorilor lui g, este construită figura „ideală" a Pămîntului.

Închipuiți-vă că faceți experiența cu un fir cu plumb la poalele unui munte înalt. Greutatea atîrnată de fir este atrasă de Pămînt spre centrul său și de munte — în lături. În aceste condiții, firul cu plumb deviază de la direcția verticalei normale (fig. 66). Întrucît masa Pămîntului este mult mai mare decît masa muntelui, aceste abateri nu depășesc cîteva secunde de unghi.

Verticala „normală" se determină după stele, deoarece pentru fiecare punct geografic s-a calculat în ce punct verticala figurii

„ideale" a Pămîntului „împunge" cerul într-un anumit moment al zilei și al anului.

Abaterile firului cu plumb conduc uneori la rezultate ciudate. De exemplu, la Florența, influența Apeninilor are ca urmare nu atragerea, ci respingerea firului cu plumb. Explicația nu poate fi decît una singură: în munți se găsește un gol imens.

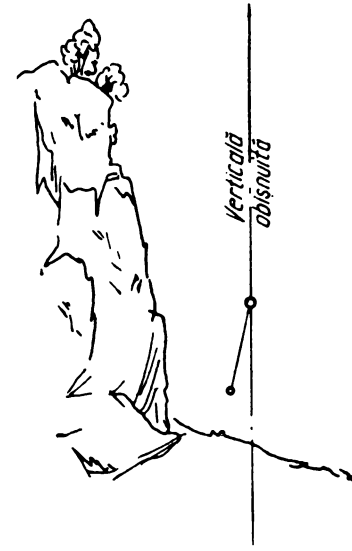


FIG. 66

Un rezultat remarcabil dau măsurările forței gravitaționale la scara continentelor și oceanelor. Continentele sînt mult mai grele decît oceanele și de aceea s-ar părea că g trebuie să fie mai mare deasupra continentelor decît deasupra oceanelor. În realitate, însă, valorile lui g, măsurate de-a lungul aceleiași paralele deasupra oceanelor și continentelor, sînt în medie identice.

Explicația este iarăși una singură: continentele „se reazemă" pe roci mai ușoare, iar oceanele pe roci mai grele. În adevăr, acolo unde au fost posibile cercetări directe, geologii au stabilit că oceanele „stau" pe roci bazaltice grele, iar continentele pe granite ușoare. Se naște însă imediat următoarea întrebare : de ce rocile grele și cele ușoare compensează atît de exact diferența dintre greutățile continentelor și oceanelor? Această compensație nu poate fi întîmplătoare, cauzele ei trebuie să-și aibă rădăcinile în structura scoarței Pămîntului.

Geologii presupun că părțile superioare ale scoarței terestre plutesc oarecum pe masa plastică (adică ușor deformabilă, ca argila umedă) care se află sub ele. Presiunea la o adîncime de circa 100 km trebuie să fie pretutindeni identică, așa cum este identică presiunea pe fundul unui vas cu apă în care plutesc bucăți de lemn de diferite greutăți. De aceea, o coloană de substanță cu aria bazei de 1 m^2, cu o adîncime de 100 km de la suprafață, trebuie să aibă aceeași greutate atît sub oceane, cît și sub continente.

Această egalizare a presiunilor (ea se numește izostazie) are ca rezultat că deasupra oceanelor și continentelor, de-a lungul

aceleiași linii de latitudine, valorile accelerației gravitației g nu diferă sensibil.

Anomaliile locale ale forței gravitaționale ne servesc așa cum micuțului Muck din povestirea lui Hauff îi servea bagheta sa magică, care lovea în pămînt acolo unde se găsea aur sau argint.

Minereurile grele trebuie căutate în locurile unde g este maxim. Dimpotrivă, zăcămintele de sare ușoare se descoperă după valoarea mai redusă a lui g. Acest g se poate măsura cu precizie pînă la a suta mia parte din 1 cm/s^2.

Metodele de explorare cu ajutorul pendulelor și al balanțelor ultrasensibile se numesc gravitaționale. Ele au o mare importanță practică, în special pentru căutarea petrolului. În adevăr, prin metode gravitaționale de explorare se pot descoperi cupolele subterane de sare și foarte adesea se întîmplă că acolo unde este sare este și petrol, petrolul găsindu-se în adîncime, iar sarea mai aproape de suprafața Pămîntului. Prin metode gravitaționale de explorare s-a descoperit petrol în Kazahstan și în alte locuri.

Gravitația în interiorul Pămîntului

Ne-a rămas să lămurim încă o problemă interesantă: cum variază forța gravitațională în interiorul Pămîntului?

Greutatea unui obiect este rezultatul tensiunii „firelor" invizibile întinse pînă la acel obiect din fiecare bucățică de substanță a Pămîntului. Greutatea este forța totală rezultată din adunarea forțelor elementare care acționează asupra obiectului din partea particulelor Pămîntului. Toate aceste forțe, deși au direcțiile înclinate sub diferite unghiuri, atrag corpul „în jos" — spre centrul Pămîntului.

Care va fi însă greutatea unui obiect care se găsește într-un laborator subteran? Asupra lui vor acționa forțe de atracție atît din partea straturilor dinspre interiorul cît și dinspre exteriorul Pămîntului.

Să considerăm forțele gravitaționale care acționează într-un punct situat în interiorul globului pămîntesc din partea unui strat dinspre exterior. Dacă se descompune acest strat în straturi subțiri, dacă se decupează dintr-unul din ele un mic pătrat cu latura a_1 și dacă se duc linii de la perimetrul acestui pătrat prin punctul O, în care ne interesează gravitația, în partea opusă a stratului se va obține un alt pătrat mic de alte dimensiuni, cu la-

tura a_2 (fig. 67). Forțele de atracție care acționează în punctul O din partea celor două pătrate sînt dirijate în sensuri opuse și conform legii atracției sînt proporționale cu m_1/r_1^2 și m_2/r_1^2. Dar masele m_1 și m_2 ale pătratelor sînt proporționale cu ariile pătrate. De aceea, forțele de atracție sînt proporționale cu expresiile a_1^2/r_1^2 și a_2^2/r_2^2.

Aceste rapoarte însă sînt egale. Din fig. 67 se vede că a_1/r_1 și a_2/r_2 sînt rapoartele laturilor omologe ale triunghiurilor OA_1B_1 și OA_2B_2, care vor fi asemenea, dacă laturile A_1B_1 și A_2B_2 ale pătratelor sînt foarte mici. Dar putem întotdeauna să le luăm cît de mici vrem.

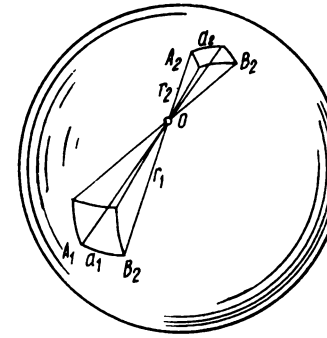


FIG. 67

În adevăr, dacă pătratele sînt mici, direcțiile segmentelor A_1B_1 și A_2B_2 diferă foarte puțin de direcțiile tangentelor în aceste puncte. Atunci se poate considera unghiul B_1A_1O și unghiul suplimentar al lui A_2B_2O egale ca unghiuri formate de tangente și coarde care au același unghi la centru.

Prin urmare, $\sphericalangle B_1A_1O = \sphericalangle OA_2B_2$. În afară de aceasta sînt egale și unghiurile de la vîrf. Așadar triunghiurile sînt asemenea.

Din această demonstrație geometrică rezultă că $\frac{a_1}{r_1} = \frac{a_2}{r_2}$ și deci forțele de atracție care acționează în punctul O, din partea celor două pătrate, se echilibrează.

Descompunînd stratul subțire în astfel de perechi de pătrate „opuse", se ajunge la un rezultat remarcabil: un strat sferic, subțire și omogen nu exercită nici o acțiune asupra unui punct situat în interiorul său. Dar acest lucru este adevărat pentru toate straturile subțiri în care am împărțit zona sferică situată deasupra punctului interior care ne interesează.

Așadar, stratul de pămînt care se găsește deasupra corpului se comportă ca și cum n-ar exista. Efectul diferitelor părți ale lui asupra corpului se echilibrează, iar forța totală de atracție din partea stratului exterior este egală cu zero.

Firește, în toate aceste raționamente am considerat densitatea Pămîntului constantă în interiorul fiecărui strat.

Rezultatul raționamentelor noastre permite să se obțină, cu ușurință, formula forței gravitaționale care acționează la o adîncime

oarecare H sub pămînt. Un punct situat la adîncimea H suferă numai atracția din patrea straturilor interioare ale Pămîntului. Formula accelerației gravitației $g = k\frac{M}{R^2}$ este aplicabilă și acestui caz, dar M și R sînt masa și raza nu a întregului Pămînt, ci ale părții sale „interioare" față de acest punct.

Dacă Pămîntul ar avea aceeași densitate în toate straturile, formula lui g ar lua forma

$$g = k\frac{\rho\frac{4}{3}\pi(RP - H)^3}{(RP - H)^2} = \frac{4}{3}\pi k\rho\,(RP - H),$$

în care ρ este densitatea, iar RP raza Pămîntului.

Aceasta înseamnă că g ar varia direct proporțional cu $(R_p - H)$: cu cît adîncimea H este mai mare, cu atît g ar trebui să fie mai mic.

De fapt însă comportarea lui g în apropiere de suprafața Pămîntului — o putem studia pînă la o adîncime de 5 km (sub nivelul mării) — nu ascultă de loc de această lege. Experiența arată că în aceste straturi, dimpotrivă, g crește cu adîncimea. Nepotrivirea dintre experiență și formulă se explică prin faptul că nu s-a ținut seama de diferența de densitate la diferite adîncimi.

Densitatea medie a Pămîntului se găsește cu ușurință prin împărțirea masei la volumul globului pămîntesc. Astfel ajungem la valoarea de 5,52. În același timp, densitatea rocilor superficiale este mult mai mică — ea este egală cu 2,75. Densitatea straturilor Pămîntului crește cu adîncimea.

În straturile superficiale ale Pămîntului, acest efect predomină asupra micșorării ideale, care rezultă din formula dedusă mai înainte și g crește.

Energia gravitațională

Dintr-un exemplu simplu am făcut cunoștință cu energia gravitațională. Un corp ridicat la înălțimea h deasupra Pămîntului are o energie potențială mgh.

Dar această formulă se poate folosi numai atunci cînd înălțimea h este mult mai mică decît raza Pămîntului.

Energia gravitațională este o mărime importantă și este interesant să se găsească o formulă a ei care să fie valabilă pentru un corp ridicat la orice înălțime deasupra Pămîntului, precum și, în

general, pentru două mase care se atrag după legea atracției universale:

$$F = k \frac{m_1 m_2}{r^2}.$$

Să presupunem că, sub influența atracției reciproce, corpurile s-au apropiat puțin unul de altul. Între ele era distanța r_1, care acum a devenit r_2. Cu acest prilej se efectuează lucrul mecanic $L = F(r_1 - r_2)$. Valoarea forței trebuie luată într-un punct mediu. Așadar,

$$L = k \frac{m_1 m_2}{r^2_{med}} (r_1 - r_2).$$

Dacă r_1 și r_2 diferă foarte puțin unul de altul, se poate înlocui r^2_{med} cu produsul $r_1 r_2$ și atunci

$$L = k \frac{m_1 m_2}{r_2} - k \frac{m_1 m_2}{r_1}.$$

Acest lucru mecanic s-a efectuat pe seama energiei gravitaționale, deci

$$L = U_1 - U_2,$$

în care U_1 este valoarea inițială, iar U_2 valoarea finală a energiei potențiale gravitaționale.

Comparînd aceste două formule, găsim pentru energia potențială expresia

$$U = -k \frac{m_1 m_2}{r}.$$

Ea seamănă cu formula forței gravitaționale, dar la numitor apare r la puterea întîi.

Conform acestei formule, pentru r foarte mari, energia potențială devine $U = 0$. Acest lucru este ușor de înțeles, deoarece, la astfel de distanțe, atracția nu se mai simte. Cînd, însă corpurile se apropie, energia potențială trebuie să se micșoreze, căci lucrul mecanic se efectuează tocmai pe seama ei.

Dar cum se poate micșora mai mult decît zero? În sensul negativ. De aceea, în formulă apare semnul minus. Se știe că -5 este mai mic decît zero, iar -10 este mai mic decît -5.

Dacă este vorba de o mișcare în preajma suprafeței Pămîntului, expresia generală a forței gravitaționale se poate înlocui cu produsul mg. Atunci avem cu mare precizie $U_1 - U_2 = mgh$.

Dar la suprafața Pămîntului un corp are energia potențială $-k\frac{Mm}{R}$, în care R este raza Pămîntului. Așadar, la înălțimea h deasupra suprafeței Pămîntului,

$$U = -k\frac{Mm}{R} + mgh.$$

Cînd am introdus pentru prima oară formula energiei potențiale $U = mgh$, am convenit să socotim înălțimea și energia de la suprafața Pămîntului în sus. Servindu-ne de formula $U = mgh$, neglijăm termenul constant $-k\frac{Mm}{R}$, adică îl considerăm în mod convențional egal cu zero. Întrucît ne interesează numai diferența de energie — căci de obicei se măsoară lucrul mecanic, care este o diferență de energii — prezența termenului constant $-k\frac{Mm}{R}$ în formula energiei potențiale nu joacă nici un rol.

Energia gravitațională determină rezistența lanțurilor care „leagă" corpul de Pămînt. Cum se pot rupe aceste lanțuri, pentru a face ca un corp aruncat de pe Pămînt să nu se mai întoarcă pe el? E clar că în acest scop trebuie să se imprime corpului o mare viteză inițială. Dar care este condiția minimă necesară?

Pe măsură ce se îndepărtează de Pămînt, energia potențială a corpului aruncat (proiectil, rachetă) va crește (valoarea absolută a lui U scade), iar energia cinetică descrește. Dacă energia cinetică a corpului devine egală cu zero în mod prematur, înainte de a se rupe din lanțul gravitației globului pămîntesc, respectivul corp se va întoarce pe pămînt.

E necesar ca corpul să-și conserve energia cinetică pînă ce energia sa potențială scade practic la zero. Înainte de a fi aruncat, proiectilul posedă o energie potențială $-k\frac{Mm}{R}$ (M și R sînt masa și respectiv raza Pămîntului). De aceea, trebuie să se imprime proiectilului o viteză care să facă pozitivă energia totală a proiectilului lansat. Un corp cu o energie totală negativă (valoarea absolută a energiei potențiale este mai mare decît valoarea energiei cinetice) nu va putea trece dincolo de sfera de atracție a Pămîntului.

Așadar, am ajuns la o condiție simplă. Pentru ca un corp cu masa m să se despartă definitiv de Pămînt, este necesar ca el să învingă energia potențială gravitațională

$$k\frac{Mm}{R}.$$

Viteza corpului trebuie să ajungă în acest caz la o anumită valoare v_2, numită a doua viteză cosmică, care se calculează cu ușurință egalînd energia cinetică cu cea potențială, adică

$$\frac{mv_2^2}{2} = k\frac{mM}{R}, \text{ de unde } v_2^2 = 2k\frac{M}{R};$$

dar, deoarece $g = k\frac{M}{R^2}$, atunci

$$v_2^2 = 2gR.$$

Valoarea lui v_2 calculată cu această formulă este de 11 km/s — fireşte, fără a se ține seamă de rezistența atmosferei. Această viteză este de $\sqrt{2} = 1{,}41$ ori mai mare decît prima viteză cosmică $v_1 = \sqrt{gR}$ a unui satelit artificial care se rotește în jurul suprafeței Pămîntului, adică $v_2 = \sqrt{2}\cdot v_1$.

Masa Lunii este de 81 de ori mai mică decît masa Pămîntului, iar raza ei este de 4 ori mai mică. De aceea, energia gravitațională pe Lună este de 20 de ori mai mică decît pe Pămînt şi deci, pentru ca un corp să se desprindă definitiv de Lună, este suficientă o viteză de 2,5 km/s.

Energia cinetică $mv_2^2/2$ se cheltuieşte pentru a rupe lanțul atracției spre planetă, spre stația de lansare. Dacă însă, după ce a învins atracția gravitațională, vrem ca racheta să se miște cu viteza v, atunci este necesar să-i furnizăm o energie suplimentară $mv^2/2$. În acest caz, în momentul lansării rachetei în călătoria sa, trebuie să i se comunice o energie $\frac{mv_0^2}{2} = \frac{mv_2^2}{2} + \frac{mv^2}{2}$. Aşadar, cele trei viteze de care e vorba sînt legate între ele prin relația simplă

$$v_0^2 = v_2^2 + v^2.$$

Cu ce trebuie însă să fie egală viteza v_3 necesară pentru învingerea atracției Pămîntului şi a Soarelui, — viteza minimă a proiectilului trimis spre stelele îndepărtate? Am notat această viteză cu v_3, pentru că ea se numeşte a treia viteză cosmică.

Vom determina în primul rînd valoarea vitezei necesare numai pentru învingerea atracției Soarelui.

După cum am arătat mai înainte, viteza necesară pentru ieşirea din sfera de atracție pămîntească a unui proiectil lansat în călătorie este de $\sqrt{2}$ ori mai mare decît viteza de lansare pe orbită a unui satelit al Pămîntului. Aceste raționamente sînt valabile

în egală măsură și în ce privește Soarele, adică viteza necesară pentru a părăsi definitiv Soarele este de $\sqrt{2}$ ori mai mare decît viteza unui satelit al Soarelui (adică Pămîntul). Întrucît viteza cu care se deplasează Pămîntul în jurul Soarelui este de aproximativ 30 km/s, viteza necesară pentru ieșirea din sfera de atracție a Soarelui este egală cu 42 km/s. Această viteză este foarte mare, dar pentru a lansa proiectilul spre stelele îndepărtate, este necesar, bineînțeles, să se folosească mișcarea globului pămîntesc și să se lanseze corpul în sensul în care se mișcă Pămîntul. Atunci este necesar să se adauge $42-30 = 12$ km/s.

Acum putem calcula, în sfîrșit, a treia viteză cosmică. Aceasta este viteza cu care trebuie lansată o rachetă pentru ca, ieșind din sfera de atracție a Pămîntului, ea să aibă o viteză de 12 km/s. Servindu-ne de formula dată mai înainte, vom obține

$$v_3^2 = 11^2 + 12^2,$$

de unde, $v_3 = 16$ km/s.

Așadar, dacă are o viteză de circa 11 km/s, un corp va părăsi Pămîntul, dar un astfel de proiectil nu va merge „departe"; Pămîntul i-a dat drumul, dar Soarele nu-l va lăsa liber. El se va transforma în satelit al Soarelui.

Am văzut că viteza necesară pentru o călătorie interstelară este doar o dată și jumătate mai mare decît viteza necesară pentru călătoria prin sistemul solar în interiorul orbitei terestre. E adevărat însă după cum s-a mai spus, că orice mărire sensibilă a vitezei inițiale a proiectilului întîmpină dificultăți tehnice destul de mari (vezi pag. 77).

Cum se mișcă planetele

La întrebarea: cum se mișcă planetele? se poate răspunde scurt: ascultînd de legea gravitației. În adevăr, forțele de atracție sînt singurele forțe aplicate planetelor.

Întrucît masa planetelor este mult mai mică decît masa Soarelui, forțele de interacțiune dintre planete nu joacă un rol prea mare. Fiecare planetă se mișcă aproape așa cum îi dictează numai forța de atracție a Soarelui, ca și cum celelalte planete nici n-ar exista.

Legile mișcării unei planete în jurul Soarelui decurg din legea atracției universale.

De altfel, istoricește, lucrurile nu s-au întîmplat așa. Legile mișcării planetelor au fost descoperite de celebrul astronom Johann

Kepler înainte de Newton, fără ajutorul legii atracției, pe baza prelucrării observațiilor astronomice, prelucrări și observații care au durat aproape 20 ani.

Drumurile, sau cum spun astronomii, orbitele pe care le descriu planetele în jurul Soarelui sînt aproape circulare.

Ce legătură este între perioada de revoluție a unei planete și raza orbitei sale?

Forța de atracție exercitată de Soare asupra unei planete este

$$F = k\frac{mM}{r^2},$$

unde M este masa Soarelui, m masa planetei, iar r distanța dintre ele.

Dar F/m, conform legii a doua a mecanicii, nu este altceva decît accelerația, și anume accelerația centripetă

$$\frac{F}{m} = \frac{v^2}{r}.$$

Viteza v a unei planete se poate considera ca fiind egală cu raportul dintre lungimea cercului $2\pi r$ și perioada de revoluție T. Înlocuind cu $v = \frac{2\pi r}{T}$ și cu expresia forței F în formula accelerației, obținem

$$\frac{4\pi^2 r}{T^2} = \frac{kM}{r^2}, \text{ adică } T^2 = \frac{4\pi^2}{kM} r^3.$$

Coeficientul de proporționalitate din fața lui r^3 este o mărime depinzînd numai de masa Soarelui, care este aceeași pentru orice planetă. Prin urmare, pentru două planete este valabilă relația

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{r_1^3}{r_2^3}.$$

Raportul dintre pătratele perioadelor de revoluție ale planetelor este egal cu raportul dintre cuburile razelor orbitelor lor. Această lege interesantă a fost dedusă experimental de Kepler. Legea atracției universale a explicat observațiile lui Kepler.

Mișcarea circulară a unui corp ceresc în jurul altuia este numai una din posibilități.

Traiectoriile unui corp care se rotește în jurul altuia, datorită forțelor de atracție, pot fi cît se poate de diferite, dar, după cum arată calculul și după cum, înainte de orice calcul, a descoperit Kepler, ele fac toate parte din aceeași clasă de curbe numite elipse.

Dacă se leagă un fir de aţă de două ace cu gămălie înfipte într-o foaie de hîrtie de desen şi dacă se întinde acest fir cu vîrful unui creion şi se deplasează acest creion în aşa fel încît firul să rămînă mereu întins, în cele din urmă se va desena pe hîrtie o curbă închisă, care este chiar o elipsă (fig. 68). Punctele în care se găsesc acele cu gămălie sînt focarele elipsei.

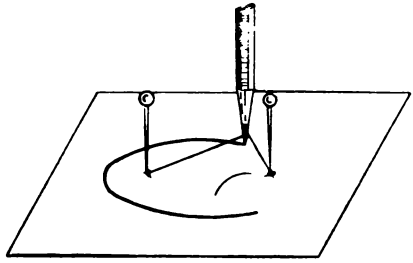


FIG. 68

Elipsele pot avea diferite forme. Dacă se ia un fir mult mai lung decît distanţa dintre acele cu gămălie, elipsa va fi foarte asemănătoare cu un cerc. Dimpotrivă, dacă lungimea firului este doar puţin mai mare decît distanţa dintre ace, se obţine o elipsă alungită, aproape o baghetă.

Traiectoriile descrise de planete sînt elipse, iar Soarele se află într-unul din focare.

Ce fel de elipse descriu însă planetele? S-a constatat că ele sînt foarte apropiate de nişte cercuri.

Cel mai diferit de un cerc este drumul planetei celei mai apropiate de Soare — Mercur. Dar şi în acest caz, diametrul mare al elipsei este numai cu 2% mai lung decît diametrul mic. Tot aşa stau lucrurile cu orbitele planetelor artificiale (fig. 69). Orbita lui Marte nu se deosebeşte de un cerc.

Întrucît însă Soarele se găseşte într-unul din focarele elipsei, nu în centrul ei, distanţa de la planetă pînă la Soare variază mai sensibil. Să ducem o linie prin cele două focare ale elipsei. Această linie intersectează elipsa în două puncte. Punctul cel mai apropiat de Soare se numeşte perigeu (sau periheliu), iar cel mai îndepărtat de Soare — apogeu (sau afeliu). Mercur, cînd se găseşte la perigeu, este de 1,5 ori mai aproape de Soare decît la apogeu.

Planetele principale descriu în jurul Soarelui elipse apropiate de un cerc. Există însă corpuri cereşti care se mişcă în jurul Soarelui pe orbite foarte alungite. Dintre aceste corpuri fac parte cometele. Orbitele lor nu suferă nici o comparaţie cu orbitele planetelor în ce priveşte alungirea. Despre corpurile cereşti care se mişcă pe orbite eliptice se poate spune că ele aparţin familiei Soarelui. Dar în sistemul nostru solar mai pătrund şi musafiri întîmplători.

S-au observat comete care descriu în jurul Soarelui astfel de curbe încît, judecînd după forma lor, s-ar putea trage concluzia

că cometa respectivă nu se va mai întoarce niciodată, că nu face parte din familia sistemului solar. Curbele „deschise" descrise de comete se numesc hiperoble.

Deosebit de repede se mișcă aceste comete cînd trec prin apropierea Soarelui. Acest lucru este ușor de înțeles: energia totală a

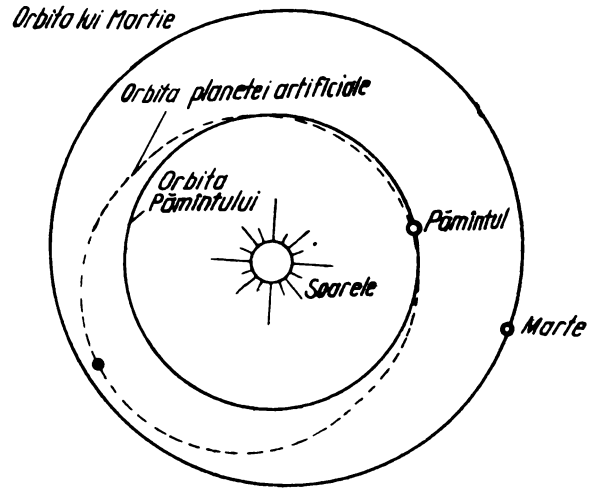


FIG. 69

cometei este constantă, iar atunci cînd cometa se apropie de Soare, ea are energia potențială minimă. Așadar, energia cinetică, de mișcare, va fi în acest caz maximă. Firește, acest efect se produce la toate planetele și deci și în cazul Pămîntului, dar acest efect este slab, deoarece diferența de energie potențială la apogeu și perigeu este mică.

O lege interesantă a mișcării planetelor decurge din legea conservării momentului impulsului.

În fig. 70 sînt reprezentate două poziții ale unei planete. Din focarul în care se află Soarele, s-au dus două raze corespunzătoare celor două poziții ale planetei. Aria mărginită de raze este sectorul haşurat din figură. Trebuie să se determine aria descrisă de rază în unitatea de timp. Dacă unghiul este mic, sectorul descris de rază într-o secundă poate fi înlocuit printr-un triunghi. Baza triunghiului este viteza v (drumul parcurs într-o secundă), iar înălțimea triunghiului este egală cu brațul d al vitezei. De aceea, aria triunghiului este $vd/2$.

Din legea conservării momentului rezultă că valoarea lui mvd este constantă în timpul mișcării. Dacă însă mvd este invariabil,

atunci nu variază nici aria $vd/2$ a triunghiului. Putem desena sectoarele corespunzătoare oricărui moment (de timp) —ele vor avea arii egale. Viteza planetei variază, dar ceea ce s-ar putea numi viteza sectorială, rămîne constantă.

Nu toate stelele sînt înconjurate de planete. Pe cer există însă

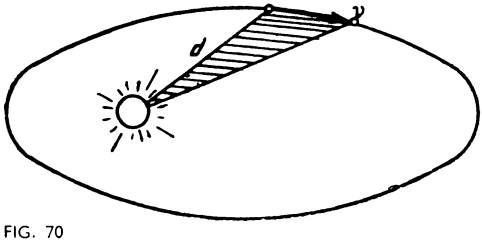


FIG. 70

destul de multe stele duble: două corpuri cereşti enorme se învîrtesc unul în jurul celuilalt.

Masa enormă a Soarelui face ca acesta să fie centrul unei familii. La stelele duble, cele două corpuri cereşti au mase apropiate ca valoare. În acest caz nu se poate considera că una din cele două stele este în repaus. Cum se produce însă mişcarea în acest caz? Ştim că orice sistem închis are un punct în stare de repaus (sau în mişcare uniformă); el este centrul de inerţie. În jurul acestui punct se rotesc ambele stele. În acelaşi timp, ele descriu nişte elipse asemenea, ceea ce rezultă din condiţia $\frac{m_1}{m_2} = \frac{r_2}{r_1}$ de la pag. 126. Elipsa uneia dintre stele este mai mare decît elipsa celeilalte de atîtea ori de cîte ori masa unei stele este mai mare decît masa celeilalte (fig. 71). Dacă masele lor sînt egale, ambele stele vor descrie în jurul centrului de inerţie traiectorii identice.

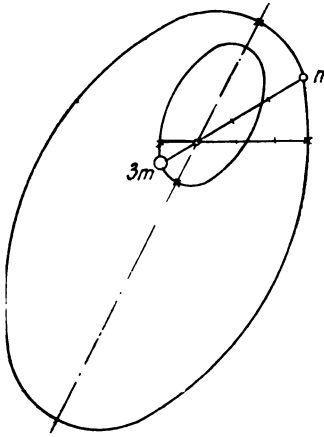


FIG. 71

Planetele sistemului solar se găsesc în condiţii ideale: ele nu sînt supuse frecării. Corpurile cereşti mici, artificiale, create de oameni — sateliţii — nu se găsesc în această situaţie ideală: forţele de frecare, chiar dacă la început sînt neînsemnate, sînt totuşi sesizabile şi au o influenţă hotărîtoare asupra mişcării lor.

Energia totală a unei planete rămîne constantă. Energia totală a unui satelit scade puțin la fiecare rotație. La prima vedere s-ar părea că frecarea face să întîrzie mișcarea satelitului. În realitate se întîmplă tocmai invers. Ne amintim în primul rînd că viteza satelitului este egală cu $\sqrt{gR}$ sau $\sqrt{k\frac{M}{R}}$, unde R este distanța de la centrul Pămîntului, iar M este masa acestuia.

Energia totală a satelitului este:

$$E = -k\frac{Mm}{R} + \frac{mv^2}{2}.$$

Înlocuind cu expresia vitezei satelitului, găsim că energia cinetică este $k\frac{mM}{2R}$. Deci energia cinetică, în valoare absolută, este de două ori mai mică decît energia potențială, iar energia totală va fi

$$E = -\frac{k}{2}\cdot\frac{mM}{R}.$$

Cînd există frecare, energia totală scade, adică (deoarece este negativă) crește în valoare absolută; distanța R începe să se micșoreze, iar satelitul coboară. Ce se întîmplă în acest timp cu componentele energiei? Energia potențială scade (crește în valoare absolută), iar energia cinetică crește.

Bilanțul general este totuși negativ, deoarece energia potențială scade de două ori mai repede față de creșterea energiei cinetice.

Frecarea are deci ca efect creșterea vitezei satelitului, nu întîrzierea mișcării.

Acum se înțelege de ce o rachetă purtătoare mare întrece satelitul mic: la o rachetă mare, frecarea este mai mare decît la satelit.

Dacă n-ar exista Luna

Nu vom analiza consecințele triste pe care le-ar avea absența Lunii pentru poeți și îndrăgostiți. Titlul acestui paragraf trebuie înțeles în sens mult mai prozaic: cum se manifestă prezența Lunii asupra mecanicii terestre?

Mai înainte, cînd am analizat ce forțe acționează asupra unei cărți așezate pe masă, am spus cu convingere: atracția Pămîntului și forța de reacțiune. Riguros vorbind însă, cartea care stă pe masă este atrasă și de Lună, și de Soare, și chiar de stele.

Luna este vecina noastră cea mai apropiată. Să uităm de Soare și de stele și să vedem cu cît se modifică greutatea unui corp de pe Pămînt sub influența Lunii.

Pămîntul și Luna se găsesc în mișcare relativă. În raport cu Luna, Pămîntul ca un tot (adică toate punctele Pămîntului) se mișcă cu accelerația $k\frac{m}{r^2}$, în care m este masa Lunii, iar r este distanța de la centrul Lunii pînă la centrul Pămîntului.

Să considerăm un corp situat la suprafața Pămîntului. Ne interesează cu cît se modifică greutatea lui sub influența Lunii. Greutatea terestră este determinată de accelerația în raport cu Pămîntul. De aceea, cu alte cuvinte, ne interesează cu cît se modifică,

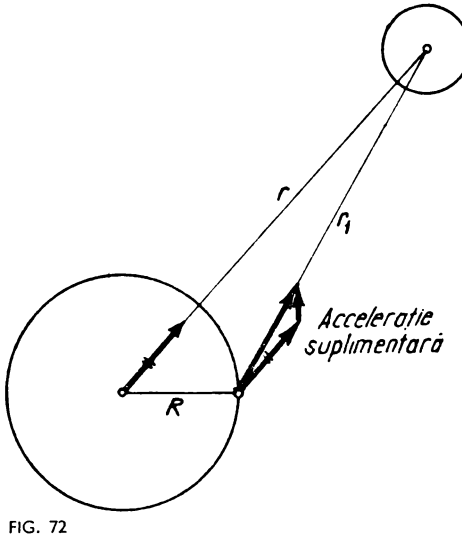


FIG. 72

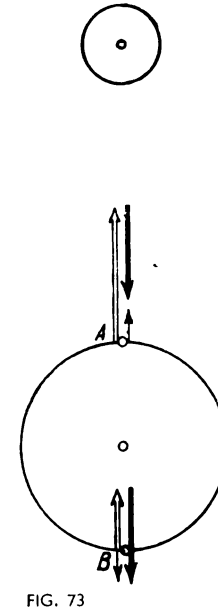


FIG. 73

sub influența Lunii, accelerația corpului, situat la suprafața Pămîntului, în raport cu Pămîntul.

Accelerația Pămîntului în raport cu Luna este $k\frac{m}{r^2}$: accelerația unui corp situat pe suprafața Pămîntului în raport cu Luna este $k\frac{m}{r_1^2}$ în care r_1 este distanța de la corp pînă la Lună (fig. 72).

Noi avem însă nevoie de accelerația suplimentară a corpului în raport cu Pămîntul; ea va fi egală cu diferența geometrică dintre accelerațiile respective.

Mărimea $k\frac{m}{r^2}$ este o constantă pentru Pămînt, iar $k\frac{m}{r_1^2}$ este diferit pentru diferitele puncte de pe suprafața Pămîntului. Așadar, și diferența geometrică care ne interesează va fi diferită pentru diferite puncte ale globului terestru.

Care va fi accelerația gravitațională pămîntească în punctul cel mai apropiat de Lună, în cel mai depărtat și la mijloc, pe suprafața Pămîntului?

Pentru a găsi accelerația unui corp provocată de Lună în raport cu centrul Pămîntului, adică corecția adusă accelerației gravitaționale pămîntești g, trebuie ca din valorile lui $k\frac{m}{r_1^2}$ în punctele menționate ale globului terestru (săgețile albe din fig. 73) să se scadă valoarea constantă $k\frac{m}{r^2}$. Totodată trebuie să se aibă în vedere că accelerația $k\frac{m}{r^2}$ — a Pămîntului spre Lună — are direcția paralelă cu linia centrelor Pămînt — Lună. Scăderea unui vector este echivalentă cu adăugarea unui vector de sens contrar. Săgețile negre din figură reprezintă vectorii $k-\frac{m}{r^2}$.

Adunînd vectorii reprezentați în figură, găsim ceea ce ne interesează: variația accelerației căderii libere pe suprafața Pămîntului, care are loc datorită influenței Lunii.

În punctul cel mai apropiat de Lună, accelerația suplimentară rezultantă va fi

$$k\frac{m}{(r-R)^2}-k\frac{m}{r^2}$$

și este dirijată spre Lună. Atracția pămîntească se micșorează, iar corpul din punctul A devine mai ușor decît în cazul în care n-ar exista Luna.

Avînd în vedere că R este mult mai mic decît r, formula se poate simplifica. Aducînd la același numitor, obținem

$$k\frac{mR\ (2r-R)}{r^2(r-R)^2}.$$

Neglijînd valoarea relativ mică a lui R din paranteze, care se scade din valorile mult mai mari r sau $2r$, obținem

$$\frac{2kmR}{r^3}.$$

Să ne mutăm acum la antipozi. În punctul B, accelerația din partea Lunii nu este mai mare, ci mai mică decît accelerația pămîntească. Dar acum ne găsim în partea mai depărtată de Lună a globului pămîntesc. Scăderea atracției Lunii are pe această parte a globului pămîntesc aceleași rezultate ca și mărirea atracției în punctul A, adică scăderea accelerației gravitației. Nu-i așa că acesta este un rezultat neașteptat? Și aici corpul devine mai ușor sub influența Lunii. Diferența

$$k\frac{m}{(r+R)^2} - k\frac{m}{r^2} \approx -\frac{2kmR}{r^3}$$

este aceeași, în valoare absolută, ca în punctul A.

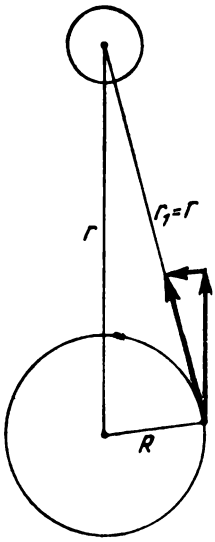


FIG. 74

Altfel stau lucrurile pe linia de mijloc. Aici accelerațiile au direcții înclinate una față de alta, iar accelerația $k\frac{m}{r^2}$ a Pămîntului spre Lună și accelerația $k\frac{m}{r_1^2}$ spre Lună a corpului situat pe Pămînt trebuie să se scadă geometric (fig. 74). Ne depărtăm foarte puțin pe linia de mijloc, dacă așezăm corpul pe Pămînt în așa fel încît r_1 și r să fie egale ca mărime. Diferența vectorială dintre accelerații constituie baza unui triunghi isoscel. Din asemănarea triunghiurilor reprezentate în fig. 74 se vede că accelerația căutată este de atîtea ori mai mică decît $k\frac{m}{r^2}$, de cîte ori R este mai mic decît r. Așadar, accelerația suplimentară pe linia de mijloc a suprafeței terestre este

$$k\frac{mR}{r^3};$$

numeric, ea este de două ori mai mică decît slăbirea forței de atracție pămîntești în punctele extreme. În ce privește direcția acestei accelerații suplimentare, după cum se vede din figură, ea coincide practic și în acest caz cu verticala în punctul respectiv

al suprafeței Pămîntului. Ea este dirijată în jos, adică are ca efect creșterea greutății corpului.

Așadar, influența Lunii asupra mecanicii terestre constă în modificarea greutății corpurilor care se găsesc pe suprafața Pămîntului, și anume în punctul cel mai apropiat și în cel mai depărtat de Lună greutatea se micșorează, iar pe linia de mijloc ea crește, modificarea greutății în cazul al doilea fiind de două ori mai mare decît în primul caz.

Bineînțeles că raționamentele făcute sînt adevărate pentru orice planetă, pentru Soare și pentru stele.

Este ușor de calculat că atît planetele, cît și stelele nu produc o accelerație nici cît o fracțiune infimă din aceea produsă de Lună.

Este foarte ușor de comparat acțiunea unui corp ceresc oarecare cu acțiunea Lunii; pentru aceasta este necesar să se împartă accelerațiile suplimentare ale acestui corp la „suplimentul lunar"

$$\frac{k\,mR}{r^3} : \frac{k\,m_{\text{Lună}}R}{r^3_{\text{Lună}}}.$$

Se obține

$$\frac{m}{m_{\text{Lună}}} \cdot \frac{r^3_{\text{Lună}}}{r^3}.$$

Acest raport este puțin mai mic decît unitatea numai pentru Soare. Soarele este mult mai departe de noi decît Luna, dar masa Lunii este de zeci de milioane mai mică decît masa Soarelui.

Înlocuind cu valorile numerice, găsim că sub influența Soarelui accelerația gravitațională pămîntească se modifică de 2,17 ori mai puțin decît sub influența Lunii.

Să calculăm acum în ce măsură s-ar modifica greutatea corpurilor pămîntești dacă Luna ar părăsi orbita sa din jurul Pămîntului. Înlocuind cu valorile numerice în expresia $2\,k\,mR/r^3$, găsim că accelerația Lunii este de ordinul a 0,000 1 cm/s^2, adică a zecea milioana parte din g.

S-ar părea că-i aproape nimic. Merită, oare, ca pentru acest efect infim să se caute cu atîta încordare să se rezolve o problemă destul de complicată de mecanică? Să nu vă grăbiți să trageți o astfel de concluzie. Acest efect „infim" este cauza mareelor puternice. El creează în fiecare 24 h o energie cinetică de 10^{16} kgf·m, deplasînd mase enorme de apă. Această energie este egală cu energia tuturor rîurilor de pe globul pămîntesc.

În adevăr, modificarea procentuală a mărimii calculate este foarte mică. Un corp care ar deveni mai ușor cu o cantitate așa de „infimă" s-ar depărta de centrul Pămîntului. Dar raza Pămîntului

este de 6 000 000 m și această abatere infimă ar măsura cîteva zeci de centimetri.

Închipuiți-vă că Luna s-ar opri din mișcarea sa în raport cu Pămîntul și ar sta undeva deasupra oceanului. Calculul arată că nivelul apei în acest punct s-ar ridica cu 54 cm. Apa s-ar ridica cu aceeași cantitate și la antipozi. Pe linia de mijloc dintre aceste puncte extreme, nivelul apei în ocean ar scădea cu 27 cm.

Datorită rotației Pămîntului în jurul axei sale, „punctele" unde nivelul oceanului se ridică și se coboară se deplasează mereu. Acestea sînt mareele. În decurs de aproximativ șase ore are loc ridicarea nivelului apei și apa se deplasează spre țărmuri — fluxul. Apoi urmează refluxul, care durează tot șase ore. În fiecare zi lunară se produc două fluxuri și două refluxuri. Manifestarea fenomenului mareelor se complică foarte mult în funcție de frecarea particulelor de apă, de forma fundului mării și de conturul țărmurilor.

De exemplu, în Marea Caspică, fluxul și refluxul este imposibil, pur și simplu, din cauză că toată suprafața mării se găsește în același timp în condiții identice.

De asemenea nu există maree la mările interioare legate cu oceanul prin strîmtori lungi și înguste, de exemplu, Marea Neagră și Marea Baltică.

Maree deosebit de puternice se produc în golfurile înguste, unde apa adusă din ocean de flux se ridică la un nivel înalt. De exemplu, în golful Ghijighinskaia, din Marea Ohotsk, nivelul apei în timpul fluxului atinge cîțiva metri.

Dacă țărmul oceanului este destul de plat (de pildă, în Franța) creșterea nivelului apei în timpul fluxului poate să modifice cu mulți kilometri poziția limitei dintre uscat și mare.

Fenomenul mareelor se opune rotației Pămîntului. Se știe că mișcarea apei produsă de maree este însoțită de frecare. Pentru învingerea acestei frecări trebuie să se cheltuiască lucru mecanic. De aceea, energia de rotație și totodată viteza de rotație a Pămîntului în jurul axei sale scad.

Acest fenomen are ca rezultat lungirea duratei zilei, despre care a fost vorba la pag. 10

Frecarea din cauza mareelor permite să se înțeleagă de ce Luna este îndreptată întotdeauna spre Pămînt cu aceeași față.

Cîndva Luna se găsea, probabil, în stare lichidă. Rotația acestui glob lichid în jurul Pămîntului era însoțită de o puternică frecare cauzată de maree, care treptat-treptat au întîrziat mișcarea Lunii. În cele din urmă, Luna a încetat să se rotească în raport cu Pămîntul, mareele au încetat, iar Luna și-a ascuns privirilor noastre jumătate din suprafața sa.

VIII

Presiunea

Presa hidraulică

Presa hidraulică este o mașină veche, dar și-a păstrat importanța pînă în zilele noastre.

În fig. 75 este reprezentată o presă hidraulică. Într-un vas închis cu apă se mișcă două pistoane, unul mic și altul mare. Dacă se apasă pe un piston, presiunea se transmite la celălalt piston, care se ridică. Cîtă apă împinge în interiorul vasului primul piston, tot atîta apă se ridică deasupra nivelului inițial la cel de-al doilea piston.

Dacă suprafețele pistoanelor sînt S_1 și S_2, iar deplasările lor sînt l_1 și l_2, egalitatea volumelor, $S_1 l_1 = S_2 l_2$, conduce la

$$\frac{l_1}{l_2} = \frac{S_2}{S_1}.$$

Să aflăm condiția de echilibru a pistoanelor.

Această condiție o vom găsi fără dificultate pornind de la faptul că lucrul mecanic al forțelor care se echilibrează trebuie să fie egal cu zero. Dacă este așa, atunci în timpul deplasării pistoanelor, lucrurile mecanice ale forțelor care acționează asupra pistoanelor trebuie să fie numeric egale (dar de semne contrare). Așadar

$$F_1 l_1 = F_2 l_2, \text{ sau } \frac{F_2}{F_1} = \frac{l_1}{l_2}.$$

Comparînd cu egalitatea precedentă rezultă că

$$\frac{F_2}{F_1} = \frac{S_2}{S_1}.$$

Această ecuație arată posibilitatea de a se realiza o creștere enormă a forței. Pistonul care transmite presiunea poate avea o arie de sute sau chiar de mii de ori mai mică. De tot atîtea ori va fi mai mare forța care acționează asupra pistonului celui mare din partea forței musculare.

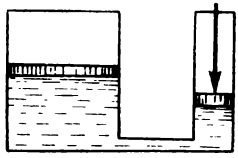


FIG. 75

Cu ajutorul presei hidraulice se pot forja și ștanța metale, se pot stoarce struguri și ridica greutăți.

Desigur, cîștigul de forță va fi însoțit de o micșorare a distanței parcurse. Pentru a comprima, cu presa, un corp cu 1 cm, mîna va trebui să parcurgă un drum de atîtea ori mai mare de cîte ori forțele F_2 și F_1 sînt mai mari una față de cealaltă.

Raportul F/S dintre forță și suprafață se numește presiune. În loc de a spune: o forță de 1 kgf acționează asupra unei suprafețe de 1 cm^2, putem spune mai scurt: presiunea (se notează cu litera p) este $p = 1$ kgf/cm^2.

În loc de raportul $\frac{F_2}{F_1} = \frac{S_2}{S_1}$ se poate scrie acum $\frac{F_2}{S_2} = \frac{F_1}{S_1}$, adică $p_1 = p_2$.

Deci presiunile pe ambele pistoane sînt egale.

Raționamentul nostru nu depinde de locul unde se găsesc pistoanele sau dacă suprafețele lor sînt orizontale, verticale sau înclinate. De fapt, pentru raționamente ne putem lipsi de pistoane. Alegînd cu gîndul două porțiuni oarecare ale suprafeței care limitează un lichid, se poate afirma că presiunea pe această suprafață este peste tot aceeași.

S-a stabilit, așadar, că presiunea în interiorul unui lichid este identică în toate punctele lui și în toate direcțiile. Cu alte cuvinte, pe o suprafață de anumite dimensiuni acționează aceeași forță, oriunde și oricum ar fi situată suprafața. Acest principiu poartă numele de principiul lui Pascal.

Presiunea hidrostatică

Principiul lui Pascal este valabil pentru lichide și pentru gaze, dar el nu ține seama de un fapt important: de existența greutății.

Acest lucru nu poate fi uitat în condițiile de pe Pământ. Și apa are greutate. De aceea, se înțelege că două suprafețe care se găsesc la adîncimi diferite sub apă vor suferi presiuni diferite. Cu ce este, însă egală această diferență? Să presupunem în interiorul unui lichid un cilindru drept, de lichid, cu bazele orizontale. Lichidul care se găsește înăuntrul lui apasă asupra lichidului înconjurător. Forța totală a acestei presiuni este egală cu greutatea *mg* a lichidului din cilindru (fig. 76). Această forță totală se compune din: forțele care acționează asupra bazelor cilindrului și cele care acționează asupra suprafeței sale laterale. Dar forțele care acționează pe fețele opuse ale suprafeței laterale sînt egale ca mărime și opuse ca sens. De aceea, suma tuturor forțelor care acționează pe suprafața laterală este egală cu zero. Deci greutatea *mg* va fi egală numai cu diferența $F_2 - F_1$ dintre forțele care acționează asupra bazelor. Dacă înălțimea cilindrului este h, suprafața bazei este S, iar densitatea lichidului este ρ, în loc de *mg* se poate scrie ρghS. Diferența dintre forțe este egală cu această valoare. Pentru a obține diferența de presiune, trebuie să împărțim greutatea la suprafața S. Diferența de presiune va fi deci egală cu ρgh.

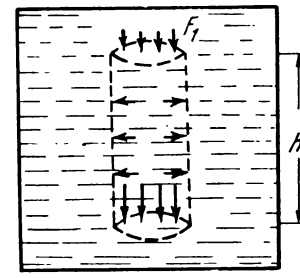


FIG. 76

În conformitate cu principiul lui Pascal, presiunea pe suprafețe orientate diferit, dar care se găsesc la aceeași adîncime, este aceeași. Așadar, în două puncte ale lichidului situate unul deasupra altuia, la înălțimea h, diferența de presiune va fi egală cu greutatea unei coloane de lichid cu secțiunea egală cu unitatea, a cărei înălțime este h:

$$P_2 - P_1 = \rho gh.$$

Presiunea apei datorită greutății sale se numește presiune hidrostatică.

În condițiile de pe Pământ, asupra suprafeței libere a unui lichid apasă, de cele mai multe ori, aerul. Presiunea aerului se numește

presiune atmosferică. Presiunea la o adîncime oarecare se compune din presiunile atmosferică și hidrostatică.

Pentru a calcula forța de presiune a apei, este nevoie să se știe numai dimensiunile suprafeței pe care apasă și înălțimea coloanei de lichid de deasupra ei. Restul, în virtutea principiului lui Pascal, nu joacă nici un rol.

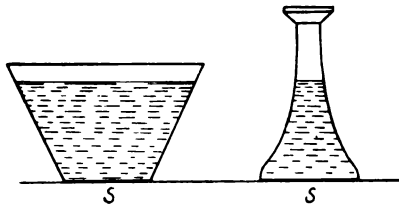


FIG. 77

Acest lucru poate părea surprinzător. Nu cumva forța care acționează asupra fundurilor egale ale celor două vase reprezentate în fig. 77 este identică? În vasul din stînga se găsește mult mai multă apă. Cu toate acestea, forțele care acționează asupra fundului în ambele cazuri sînt egale cu ρghS. Această forță este mai mare decît greutatea apei din vasul din stînga. În vasul din stînga, pereții laterali iau asupra lor greutatea „surplusului" de apă, iar în vasul din dreapta, dimpotrivă, ei adaugă la greutatea apei forțele de reacțiune. Acest fapt interesant se numește uneori paradoxul hidrostatic.

Dacă două vase de forme diferite, dar în care apa se găsește la același nivel, se unesc printr-un tub, apa nu va trece dintr-un vas în celălalt. O astfel de trecere ar putea avea loc în cazul în care presiunile în vase ar fi diferite. Dar nu este cazul și deci în vasele comunicante, indiferent de forma lor, lichidul se va găsi întotdeauna la același nivel.

Dimpotrivă, dacă nivelurile apei în vasele comunicante sînt diferite, apa va începe să se deplaseze pînă cînd nivelurile se vor egaliza.

Presiunea apei este mult mai mare decît cea a aerului. La adîncimea de 10 m, apa apasă pe 1 cm^2 cu o forță de 1 kgf în plus peste presiunea atmosferică, iar la adîncimea de 1 km, cu o forță de 100 kgf pe 1 cm^2.

Oceanul are în unele puncte o adîncime mai mare de 10 km. Forțele de presiune ale apei la astfel de adîncimi sînt extraordinar de mari. Bucățile de lemn cufundate la o adîncime de 5 km sînt comprimate de această presiune enormă atît de mult, încît după un astfel de „botez" se scufundă într-un butoi cu apă ca niște cărămizi.

Această presiune enormă pune mari piedici cercetătorilor vieții marine. Scufundările la adîncimi mari se fac în sfere de oțel — așa-numite batiscafuri, care trebuie să suporte presiuni mai mari de 1 t pe 1 cm^2.

Submarinele însă pot coborî numai la adîncimi de 100—200 m.

Presiunea atmosferei

Noi trăim pe fundul unui ocean de aer — atmosfera. Orice corp, orice grăunte de nisip, orice obiect care se găsește pe Pămînt este supus presiunii aerului.

Presiunea atmosferică nu e chiar atît de mică. Pe fiecare centimetru pătrat de suprafață a unui corp acționează o forță de aproximativ 1 kgf.

Cauza presiunii atmosferice este evidentă. Ca și apa, aerul are greutate și deci exercită o presiune egală (ca și la apă) cu greutatea coloanei de aer care se găsește deasupra corpului. Cu cît vom urca mai sus pe un munte, cu atît vom avea mai puțin aer deasupra noastră și deci cu atît presiunea atmosferică va deveni mai mică.

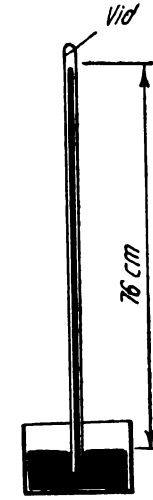


FIG. 78

În scopuri științifice și practice, trebuie să știm să măsurăm presiunea. Pentru măsurări există aparate speciale numite barometre.

Un barometru se confecționează relativ ușor. Într-un tub astupat la un capăt se toarnă mercur. Acoperind cu degetul capătul deschis al tubului, îl răsturnăm și-l cufundăm cu acest capăt într-un mic vas cu mercur. Atunci mercurul din tub va coborî, dar nu se va scurge complet din tub. Spațiul din tub de deasupra mercurului este fără îndoială lipsit de aer. Mercurul rămas în tub este menținut acolo de presiunea aerului exterior (fig. 78).

Oricare ar fi dimensiunile vasului cu mercur, oricare ar fi diametrul tubului, mercurul se ridică întotdeauna aproximativ la aceeași înălțime: 76 cm.

Dacă se ia un tub mai scurt de 76 cm, el se va umple complet cu mercur și nu vom avea vid deasupra coloanei de mercur. O coloană de mercur cu înălțimea de 76 cm apasă asupra suportului său cu aceeași forță ca și atmosfera.

O coloană de mercur cu înălțimea de 76 cm și cu suprafața bazei de 1 cm^2 cîntărește circa 1 kgf sau, mai exact, 1,033 kgf. Această valoare reprezintă volumul de mercur de 1×76 cm^3 înmulțit cu densitatea lui de 13,6. Un kilogram pe un centimetru pătrat este tocmai valoarea presiunii atmosferice normale.

Valoarea de 76 cm indică faptul că o astfel de coloană de mercur echilibrează coloana de aer a întregii atmosfere situate deasupra unei suprafețe egale.

Calculînd suprafața Pămîntului cu formula $4\pi R^2$, vom găsi că greutatea întregii atmosfere se exprimă prin valoarea enormă de $5 \cdot 10^{18}$ kgf.

Tubului barometric i se pot da cele mai diferite forme; un singur lucru este important: un capăt al tubului trebuie să fie astupat astfel încît deasupra mercurului să nu se găsească aer. Asupra mercurului din vas acționează presiunea atmosferei.

Cu barometrul cu mercur se poate măsura presiunea atmosferică cu o precizie foarte mare. Se înțelege că nu este neapărat necesar să se folosească mercur; orice alt lichid este bun în acest scop. Dar mercurul este lichidul cel mai greu și deci înălțimea coloanei de mercur, la presiune normală, este cea mai mică.

Pentru măsurarea presiunii se folosesc diferite unități. Adesea se indica pur și simplu înălțimea coloanei de mercur în milimetri. De exemplu, se spune că astăzi presiunea este deasupra celei normale, și este egală cu 768 mm Hg (adică mercur).

Cunoscînd densitatea mercurului, se poate întotdeauna recalcula presiunea kilogram-forță pe centimetru pătrat. Fiecare milimetru de coloană de mercur este egal cu 1,36 gf/cm^2.

Presiunea de 760 mm Hg se numește uneori atmosferă fizică. Presiunea de 1 kgf/cm^2 se numește atmosferă tehnică.

Fizicienii folosesc adesea și unitatea de presiune numită bar. 1 bar = 10^6 dyn/cm^2. Întrucît 1 gf = 981 dyn, 1 bar este egal aproximativ cu o atmosferă. Mai precis, presiunea atmosferică normală este egală cu aproximativ 1 013 mbar (milibari).

Barometrul cu mercur nu este un instrument prea comod. Trebuie evitat ca suprafața mercurului să rămînă descoperită (vaporii de mercur sînt otrăvitori) și, în afară de aceasta, instrumentul nu este portabil.

Aceste defecte lipsesc la barometrele metalice sau aneroide (adică fără aer).

Toată lumea a văzut un astfel de barometru. El constă dintr-o cutie rotundă de metal cu o scală și un ac indicator. Pe scală sînt

marcate valorile presiunii, de obicei în centimetri de coloană de mercur.

Din cutia metalică se scoate aerul. Capacul cutiei este menținut de un resort, deoarece altminteri el ar fi turtit de presiunea atmosferică. Cînd presiunea variază, capacul sau se încovoaie înăuntru, sau se bombează. Capacul este în legătură cu un ac indicator, în așa fel încît cînd capacul se comprimă, acul se deplasează spre dreapta.

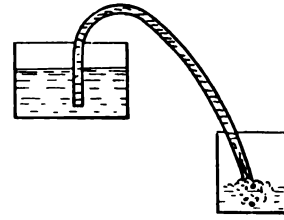


FIG. 79

Un astfel de barometru se etalonează prin comparația indicațiilor sale cu ale unui barometru cu mercur.

Dacă vreți să aflați presiunea, nu uitați să ciocăniți barometrul cu degetul. Acul cadranului are frecare mare și de obicei se oprește la „vremea de ieri".

Pe efectele presiunii atmosferice se bazează un dispozitiv simplu — sifonul.

Un șofer vrea să dea ajutor unui tovarăș al său, căruia i s-a terminat benzina. Cum poate însă scoate benzina din rezervorul automobilului său, căci acesta nu se poate înclina ca un ceainic ?

El se servește de un tub de cauciuc. Un capăt al acestuia se introduce în rezervorul de benzină, iar pe celălalt capăt se suge aerul din tub cu gura. Apoi, cu o mișcare repede, se strînge capătul deschis între degete și se pune la un nivel mai jos decît al rezervorului de benzină. Acum se poate lua mîna de pe tub, iar benzina se va scurge din el (fig. 79).

Tubul de cauciuc încovoiat este un sifon. În acest caz, lichidul se scurge din aceeași cauză ca și printr-un tub drept înclinat. În ambele cazuri, lichidul curge, în definitiv, în jos.

Pentru ca sifonul să funcționeze, este necesară presiunea atmosferică: ea „sprijină" lichidul și nu lasă coloana de lichid din tub să se întrerupă. Dacă n-ar exista presiunea atmosferică, coloana s-ar rupe în punctul unde tubul face cotul și lichidul s-ar scurge în ambele vase.

Sifonul începe să funcționeze cînd lichidul din ramura din dreapta (ca să spunem așa, „de golire") coboară sub nivelul lichidului ce urmează a fi transvazat, în care este cufundată ramura din stînga a tubului. În caz contrar, lichidul curge înapoi.

Cum s-a aflat despre existența presiunii atmosferice

Pompele aspiratoare erau cunoscute încă din antichitate. Cu ajutorul lor se putea ridica apa la o înălțime considerabilă. Apa urma uimitor de docilă pistonul unei astfel de pompe.

Filozofii antici au meditat asupra cauzelor acestui fenomen și au ajuns la următoarea concluzie profundă: apa urmează pistonul, deoarece natura se teme de vid și de aceea între piston și apă nu rămîne nici un spațiu liber.

Se povestește că un meșter a construit pentru grădinile ducelui de Toscana din Florența o pompă aspiratoare, al cărei piston trebuia să tragă apă la o înălțime mai mare de 10 m. Dar oricum s-a încercat să se aspire apă cu această pompă, nu s-a putut face nimic. La 10 m, apa se ridica după piston, dar mai departe pistonul se despărțea de apă și se forma acel vid de care natura are teamă.

Cînd Galilei a fost rugat să explice cauza insuccesului, el a răspuns că naturii, în adevăr, nu-i place vidul, dar pînă la o anumită limită. Torricelli, elevul lui Galilei, evident, a folosit acest caz ca motiv pentru a face în anul 1643 celebra sa experiență cu tubul umplut cu mercur. Am descris mai înainte această experiență: construcția barometrului cu mercur este tocmai experiența lui Torricelli.

Luînd un tub cu înălțimea de 76 cm, Torricelli a făcut vid deasupra mercurului (el se numește adesea, în cinstea lui, vidul lui Torricelli) și a demonstrat astfel existența presiunii atmosferice.

Prin această experiență, Torricelli a lămurit nedumerirea meșterului ducelui de Toscana. În adevăr, este clar că pe o distanță de cîțiva metri, apa va urma docil pistonul pompei aspiratoare. Această mișcare va continua pînă ce coloana de apă cu suprafața de 1 cm^2 va atinge greutatea de 1 kgf. O astfel de coloană de apă va avea înălțimea de 10 m. Iată de ce natura are oroare de vid... dar cel mult pînă la 10 m.

În anul 1654, după 11 ani de la experiența lui Torricelli, acțiunea presiunii atmosferice a fost pusă în evidență în mod sugestiv de către primarul din Magdeburg, Otto von Göricke. Autorul experienței a devenit celebru nu atît pentru caracterul fizic al experienței, cît pentru modul teatral în care ea a fost organizată.

Două emisfere de cupru au fost unite printr-o garnitură inelară. Printr-un robinet montat la una din emisfere s-a scos aerul din sfera astfel formată, după care nu s-au mai putut despărți emisferele. S-a păstrat descrierea amănunțită a experienței lui Göricke. Presiunea atmosferică asupra emisferei se poate acum calcula: diametrul sferei fiind de 37 cm, forța era de aproximativ 4 t.

Pentru a separa emisferele, Göricke a poruncit să se înhame două atelaje de cîte opt cai, cîte unul de fiecare emisferă. Hamurile erau legate cu niște frînghii trecute prin inelele fixate de emisfere. Caii n-au putut să despartă emisferele.

Forțele a opt cai (numai opt, nu șaisprezece, deoarece al doilea atelaj de opt cai, înhămați pentru a produce mai mult efect, putea fi înlocuit cu un cîrlig fixat într-un zid, căci forța exercitată asupra emisferelor ar fi rămas aceeași) au fost insuficiente pentru a separa emisferele de Magdeburg.

Dacă între două corpuri care se ating există o cavitate fără aer, aceste corpuri nu se pot despărți unul de altul, din cauza presiunii atmosferice.

Presiunea atmosferică și vremea

Variațiile presiunii atmosferice din cauza vremii au un caracter foarte neregulat. Cîndva se credea că numai presiunea atmosferică determină starea timpului. De aceea încă de pe atunci se scria pe barometre: timp frumos, uscat, ploaie, furtună. Se găsește uneori chiar scris: „cutremur de pămînt".

Variațiile de presiune joacă în adevăr un rol important în schimbarea vremii, dar acest rol nu este hotărîtor. Presiunea medie sau normală la nivelul mării este de 1 013 mbar. Variațiile de presiune sînt relativ mici. Presiunea scade rareori sub 935—940 mbar și crește pînă la 1 055—1 060 mbar.

Cea mai joasă presiune s-a observat la 18 august 1927 în Marea Chinei: 885 mbar. Cea mai înaltă presiune — circa 1 080 mbar — s-a observat la 23 ianuarie 1900 în Siberia, la stația Barnaul (toate valorile sînt luate în raport cu nivelul mării).

În fig. 80 este reprezentată o hartă de care se servesc meteorologii care analizează schimbările vremii. Liniile trase pe această hartă se numesc izobare. De-a lungul fiecăreia din aceste linii presiunea este aceeași (mărimea ei este indicată de o cifră). Regiunile cu cea mai joasă și cu cea mai înaltă presiune sînt „vîrfurile" și „gropile" de presiune.

De distribuția presiunii atmosferice sînt legate direcția și forța vîntului.

Presiunea în diferite puncte ale suprafeței Pămîntului este diferită; presiunea mai mare „refulează" aerul în punctele cu presiune

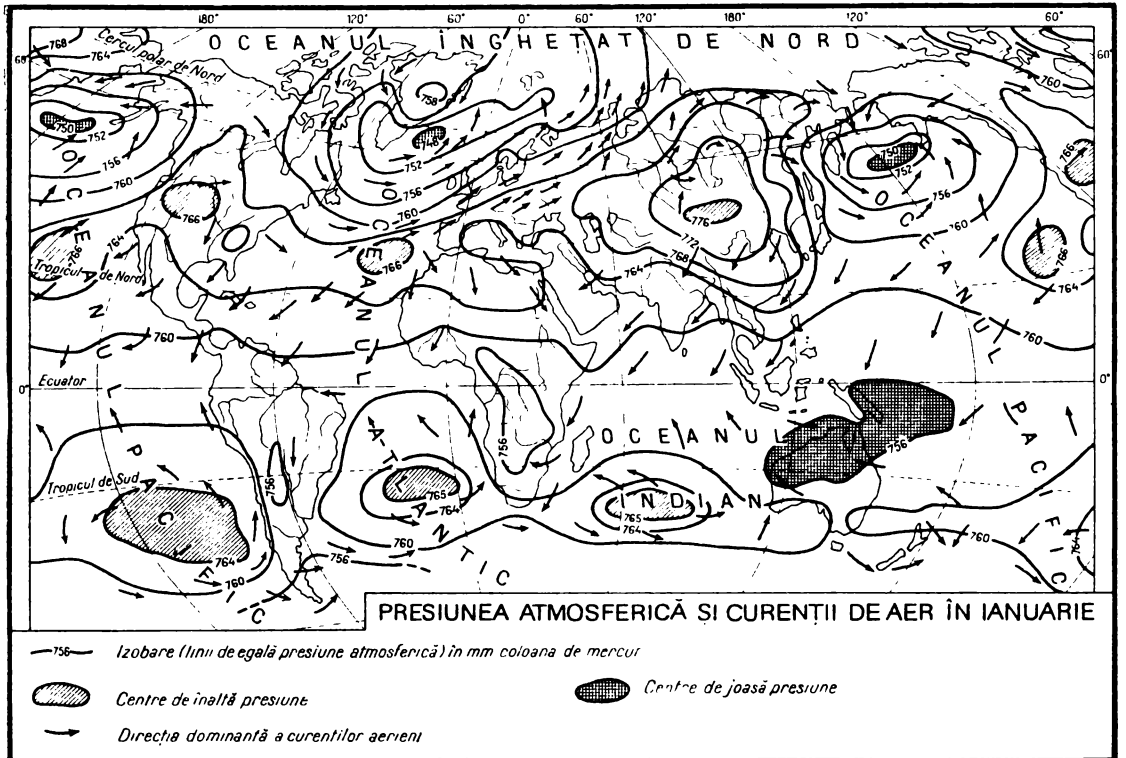

OCEANUL ÎNGHEȚAT DE NORD
Cercul polar de Nord
Tropicul de Nord
Ecuator
Tropicul de Sud
OCEANUL ATLANTIC
OCEANUL INDIAN
OCEANUL PACIFIC
PRESIUNEA ATMOSFERICĂ ȘI CURENȚII DE AER ÎN IANUARIE
Izobare (linii de egală presiune atmosferică) în mm coloană de mercur
Centre de înaltă presiune
Centre de joasă presiune
Direcția dominantă a curenților aerieni

FIG. 80

mai joasă. S-ar părea că vîntul trebuie să sufle în direcție perpendiculară pe izobare, adică în direcția în care presiunea scade mai repede, dar hărțile vînturilor arată altfel. În afară de presiune mai intervine forța Coriolis datorită căreia se introduce o corecție foarte însemnată.

După cum știm, asupra oricărui corp care se mișcă în emisfera nordică acționează o forță Coriolis dirijată spre dreapta față de direcția mișcării. O particulă refulată dintr-un punct cu presiune mai mare spre un punct unde presiunea este mai mică trebuie să se miște perpendicular pe izobare, dar forța Coriolis o deviază spre dreapta, iar direcția vîntului formează un unghi de aproximativ 45° cu direcția izobarelor.

Efortul este uimitor de mare pentru o forță atît de mică. Aceasta se explică prin faptul că obstacolele întîmpinate de forța Coriolis — frecarea straturilor de aer — sînt de asemenea neînsemnate.

Și mai interesantă este influența forței Coriolis asupra direcției vînturilor în „vîrfurile" și „gropile" de presiune. Din cauza forței Coriolis, aerul, pornind din „vîrfurile" de presiune, nu se scurge în toate părțile radial, ci se mișcă după niște linii curbe, niște spirale. Acești curenți spirali de aer se răsucesc în același sens și creează, în regiunile de înaltă presiune, un vîrtej circular care deplasează masele de aer în sensul acelor unui ceasornic. Din fig. 28 (vezi pag. 69) se vede clar cum mișcarea radială se transformă în mișcare spirală sub influența unei forțe constante de deviere.

Același lucru se petrece și în regiunile de joasă presiune. Dacă n-ar exista forța Coriolis, aerul s-ar scurge spre această regiune în mod uniform și radial, dar pe drum masele de aer deviază spre dreapta. În acest caz, după cum rezultă din figură, se formează un vîrtej circular care mișcă aerul în sens contrar acelor unui ceasornic.

Vînturile din regiunea de joasă presiune se numesc cicloane, iar vînturile din regiunea de înaltă presiune se numesc anticicloane.

Nu trebuie să se creadă că orice ciclon înseamnă uragan sau furtună. Trecerea cicloanelor sau a anticicloanelor prin orașul în care locuim este un fenomen obișnuit, care, ce-i drept, are legătură în mare parte cu schimbarea vremii. În multe cazuri, apropierea unui ciclon înseamnă că vine vreme rea, iar apropierea unui anticiclon — vreme bună.

Principiul lui Arhimede

Să suspendăm o greutate de un cîntar. Resortul acestuia se va întinde și va indica greutatea obiectului. Fără a lua greutatea de pe cîrligul cîntarului, s-o scufundăm în apă. Oare indicația cîntarului se va modifica? Da, greutatea corpului pare să fi scăzut. Dacă se face experiența cu un corp de fier cu greutatea de 1 kg, „micșorarea" greutății va fi de aproximativ 140 gf.

Ce se întîmplă? Este clar că nici masa corpului, nici atracția Pămîntului nu s-au putut modifica. Cauza pierderii de greutate nu poate fi decît una singură: asupra corpului scufundat în apă acționează de jos în sus o forță de 140 gf. De unde provine această forță de împingere descoperită de marele învățat al antichității, Arhimede? Înainte de a considera un corp solid în apă, să considerăm „apa în apă". Să detașăm cu gîndul un volum oarecare de apă. Cantitatea de apă din acest volum are greutate, dar nu cade la fund. De ce? Răspunsul e clar: presiunea hidrostatică a apei înconjurătoare împiedică acest lucru. Aceasta înseamnă că rezultanta acestei presiuni în volumul considerat este egală cu greutatea apei și este dirijată vertical de jos în sus.

Dacă acum același volum este ocupat de un corp solid, rezultă că presiunea hidrostatică rămîne aceeași.

Așadar, asupra unui corp cufundat într-un lichid acționează, datorită presiunii hidrostatice, o forță dirijată vertical de jos în sus, numeric egală cu greutatea volumului de apă dislocuit de corp. Acesta este principiul lui Arhimede.

Se povestește că Arhimede stătea în baie și se gîndea cum ar putea afla dacă într-o coroană de aur este amestecat și argint. Făcînd baie, savantul simțea perfect cum este împins în sus de o forță. Pe neașteptate, Arhimede a descoperit un principiu, care i se prezenta cu o simplitate remarcabilă. Exclamînd „Evrika!" (ceea ce înseamnă „am găsit"), Arhimede sări din baie și dădu fuga în cameră ca să ia coroana prețioasă și să determine fără întîrziere ce greutate pierdea în apă.

Pierderea de greutate a unui corp cufundat în apă, exprimată în grame, este egală cu greutatea apei dislocuite de corp. Cunoscînd greutatea apei, putem determina imediat volumul ei, care este egal cu volumul coroanei. Cunoscînd greutatea coroanei, se poate determina imediat densitatea materialului din care este făcută și, cunoscînd densitatea aurului și a argintului, se poate găsi proporția de metal străin din ea.

Principiul lui Arhimede este valabil, bineînțeles, pentru orice lichid. Dacă într-un lichid cu densitatea ρ se cufundă un corp avînd

volumul V, greutatea volumului de lichid dislocuit — aceasta este chiar forța de împingere de jos în sus — va fi egală cu ρgV.

Pe principiul lui Arhimede se bazează funcționarea unor aparate simple cu care se controlează proprietățile produselor lichide. Dacă se diluează alcoolul sau laptele cu apă, densitatea lor se modifică, iar după densitate se poate cunoaște compoziția. O astfel de măsurare se poate face simplu și repede cu ajutorul areometrului (fig. 81). Areometrul introdus într-un lichid se scufundă mai mult sau mai puțin, în funcție de densitatea respectivului lichid.

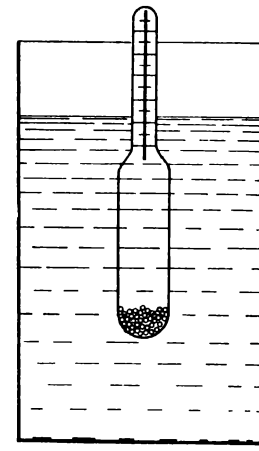


FIG. 81

Areometrul va fi în echilibru cînd forța lui Arhimede devine egală cu greutatea areometrului.

Areometrul are diviziuni; densitatea lichidului se citește în dreptul diviziunii care se găsește la nivelul lichidului. Areometrele care se folosesc la controlul alcoolului se numesc alcoolmetre, iar cele pentru controlul laptelui — lactometre.

Densitatea medie a corpului omenesc este ceva mai mare decît unitatea. În apă dulce, cine nu știe să înoate, se îneacă. Apa sărată are densitatea mai mare decît unitatea. În majoritatea mărilor, salinitatea apei este neînsemnată, iar densitatea apei este doar cu puțin mai mare decît unitatea, dar mai mică decît densitatea medie a corpului omenesc. Densitatea apei în golful Kara-Bogaz (golf din Marea Caspică) este 1,18. Ea este mai mare decît densitatea medie a corpului omenesc. În acest golf nu te poți îneca. Se poate sta culcat pe apă, citind o carte.

Gheața plutește pe apă. De altfel, prepoziția „pe" nu este pe deplin la locul ei aici. Densitatea gheței este aproximativ cu 10% mai mică decît densitatea apei și, de aceea, conform principiului lui Arhimede, rezultă că o bucată de gheață se scufundă în apă cu circa 0,9 din volumul ei. Tocmai din această cauză întîlnirea navelor cu aisbergurile este atît de periculoasă.

Dacă o balanță cu pîrghie se află în echilibru în aer, nu înseamnă că ea va fi în echilibru și în vid. Principiul lui Arhimede se aplică aerului în aceeași măsură ca și apei. Asupra unui corp care se găsește în aer acționează o forță de împingere egală cu greutatea

unui volum de aer egal cu volumul corpului. În aer, un corp „cîntărește" mai puțin decît în vid. Pierderea de greutate este cu atît mai mare cu cît volumul corpului este mai mare. O tonă de lemn pierde mai mult din greutate decît o tonă de plumb. La întrebarea glumeață: care este mai greu? se poate da următorul răspuns: o tonă de plumb este mai grea decît o tonă de lemn, dacă aceste materiale se cîntăresc în aer.

Pierderea de greutate în aer este mică, dacă corpurile respective au dimensiuni mici, dar dacă am cîntări un obiect avînd dimensiunile unei camere, s-ar „pierde" cîteva zeci de kilograme. Cînd se fac cîntăriri de precizie, trebuie să se țină seamă de corecția pentru pierderea de greutate în aer.

Forța lui Arhimede pentru aer permite să se construiască baloane, aerostate și dirijabile de tot felul. În acest scop trebuie să avem un gaz mai ușor decît aerul.

Dacă un balon avînd volumul de 1 m^3 se umple cu hidrogen, a cărui greutate este de 0,09 kgf pe 1 m^3, forța ascensională — diferența dintre forța lui Arhimede și greutatea gazului — va fi

$$1{,}29 \text{ kgf} - 0{,}09 = 1{,}20 \text{ kgf}$$

(1,29 kg/m^3 este densitatea aerului).

Așadar, de acest balon se poate suspenda circa un kilogram de obiecte, fără ca aceasta să împiedice ridicarea pînă dincolo de nori.

Prin urmare, cu un volum relativ mic — de cîteva sute de metri cubi — baloanele cu hidrogen pot ridica în aer greutăți însemnate.

Un neajuns serios al aerostatelor cu hidrogen este inflamabilitatea hidrogenului. Împreună cu aerul, hidrogenul formează un amestec detonant. În istoria aerostatelor s-au înregistrat numeroase accidente cu urmări tragice.

De aceea, după descoperirea heliului, baloanele au început să fie umplute cu acest gaz. Heliul este de două ori mai greu ca hidrogenul, deci forța ascensională a unui balon umplut cu heliu este mai mică. Este însă această diferență substanțială? Forța ascensională a unui balon sferic de 1 m^3, umplut cu heliu, este dată de diferența

$$1{,}29 \text{ kgf} - 0{,}18 \text{ kgf} = 1{,}11 \text{ kgf}.$$

Forța ascensională s-a micșorat doar cu 9%. În același timp, calitățile heliului sînt evidente.

Aerostatul a fost primul aparat cu ajutorul căruia oamenii s-au ridicat în aer. Aerostatele cu nacelă închisă ermetic se folosesc pînă în ziua de azi pentru explorarea straturilor superioare ale atmosferei. Ele se numesc stratostate. Stratostatele se pot ridica la înălțimi de peste 20 km.

În prezent se folosesc pe scară largă baloane sferice prevăzute cu diferite instrumente de măsură, care transmit prin radio rezultatele măsurărilor lor (fig. 82) și care se numesc radiosonde. Astfel de radiosonde duc cu ele un aparat miniatural de radioemisiune cu niște mici baterii, care comunică prin semnale convenționale umiditatea, temperatura și presiunea atmosferică la diferite înălțimi.

Se poate lansa un aerostat nedirijabil într-o călătorie îndepărtată și se poate stabili destul de exact unde va ateriza. Pentru aceasta trebuie ca aerostatul să se ridice la o mare înălțime, de ordinul a 20 — 30 km. La aceste înălțimi, curenții atmosferici sînt foarte stabili și se poate calcula dinainte destul de precis drumul aerostatului.

La nevoie se poate modifica automat forța ascensională a unui aerostat, dînd drumul la o parte din gaz sau aruncînd balast (lest).

În trecut, pentru călătoriile aeriene se foloseau aerostate pe care era instalat un motor cu elice. Acestor aerostate — ele se numeau dirijabile — li se dădeau forme aerodinamice. Dirijabilele n-au rezistat concurenței avioanelor; în comparație chiar cu avioanele vechi de acum 30 ani, ele sînt voluminoase, se dirijează greu, se mișcă încet și au „plafon jos".

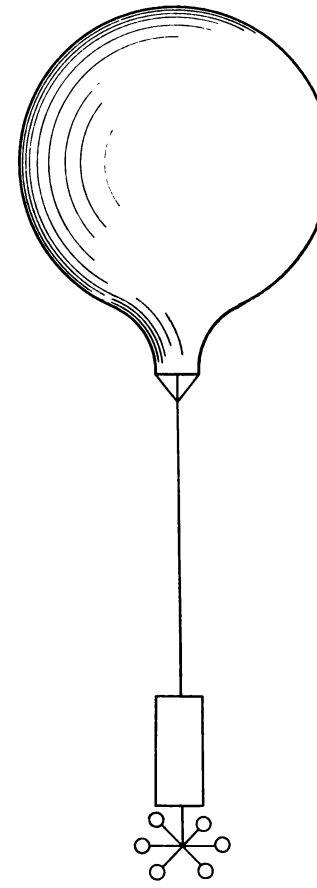


FIG. 82

Presiuni de milioane de atmosfere

În fiecare zi ne întîlnim cu forțe mari aplicate pe suprafețe mici. Să calculăm, de exemplu, care e forța care revine vîrfului unui ac. Să presupunem că vîrful unui ac sau al unui cui are dimensiunea liniară de 0,1 mm. Aceasta înseamnă că aria vîrfului este egală cu 0,000 1 cm^2. Dacă asupra unui astfel de cuișor acționează o forță foarte mică, de 10 kgf, vîrful cuișorului va exercita o presiune de 100 000 atm. Nu este de mirare deci, că obiectele ascuțite pătrund atît de ușor în corpurile cu densitate mare.

Din acest exemplu rezultă că realizarea de apăsări mari pe suprafețe mici este un lucru foarte obișnuit. Cu totul altfel stau lucrurile dacă este vorba de realizarea unor apăsări mari pe suprafețe mari.

Presiunile înalte se produc în laborator cu ajutorul unor prese puternice, de exemplu hidraulice (fig. 83). Efortul presei se transmite la un piston cu secțiune mică, care pătrunde în vasul în care se urmărește a se produce presiunea înaltă.

În modul acesta se pot produce fără mare greutate presiuni de cîteva mii de atmosfere. Pentru obținerea unor presiuni supraînalte, însă, experiența trebuie complicată, deoarece materialul vasului nu rezistă la asemenea presiuni.

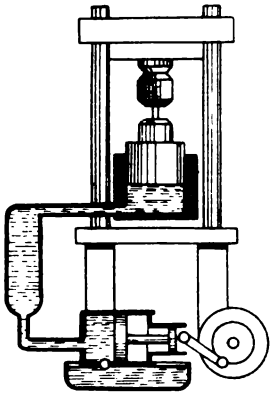


FIG. 83

În această împrejurare, natura ne-a venit în ajutor, căci la presiuni de ordinul de 20 000 atm, metalele devin mult mai rezistente. De aceea aparatul pentru producerea presiunilor supraînalte se cufundă într-un lichid care se găsește sub o presiune de ordinul a 30 000 atm. În acest caz se reușește să se producă în vasul interior (tot cu un piston) o presiune de cîteva sute de mii de atmosfere. Cea mai înaltă presiune — 400 000 atm — a fost obținută de fizicianul american Bridgeman.

Interesul pentru obținerea presiunilor supraînalte nu este de loc neîntemeiat. La astfel de presiuni se pot produce fenomene care nu pot fi provocate prin alt mijloc. În anul 1955 s-au obținut diamante artificiale. În acest scop era nevoie de o presiune de 100 000 atm și, în plus, de o temperatură de 2 300°C.

Presiuni supraînalte de ordinul a 300 000 atm pe suprafețe mari se produc în timpul exploziei explozivilor solizi și lichizi: nitroglicerină, trotil etc.

Presiuni incomparabil mai înalte, care ating 10^{13} atm, iau naștere în interiorul bombei atomice cînd aceasta explodează.

În cazul exploziilor, presiunile durează un timp foarte scurt. Presiuni înalte permanente există în interiorul corpurilor cerești, inclusiv, firește, în adîncul Pămîntului. Presiunea în centrul globului pămîntesc este de aproximativ trei milioane de atmosfere.

Forțele superficiale

Se poate ieși uscat din apă? Desigur, pentru aceasta este necesar să ne ungem cu o substanță pe care nu o udă apa.

Ungeți-vă un deget cu parafină și băgați-l apoi în apă. Cînd îl veți scoate, veți vedea că apa nu s-a prins de deget, în afară de două-trei mici picături. Mișcați puțin degetul — și picăturile se vor scutura.

În acest caz se spune că apa nu udă parafina. Mercurul se comportă în același fel față de aproape toate corpurile solide: mercurul nu udă pielea, sticla, lemnul etc.

Apa este mai capricioasă. Ea se lipește tare de unele corpuri și caută să fugă de altele. Apa nu udă suprafețele unsuroase, dar udă bine sticla curată, lemnul, hîrtia, lîna.

Dacă se pune o picătură de apă pe un geam curat, ea se va întinde și va forma o pojghiță foarte subțire. Dacă aceeași picătură se pune pe parafină, ea rămîne pe loc sub formă de picătură aproape sferică, puțin turtită de forța gravitațională.

Printre substanțele care udă aproape toate corpurile se numără și petrolul lampant. Căutînd să se scurgă pe sticlă sau pe metal, petrolul este capabil să se strecoare afară dintr-un vas prost astupat. O pată de petrol vărsat poate crea neajunsuri multă vreme: petrolul cotropește suprafețele mari, se furișează în crăpături, pătrunde în haine. De aceea este atît de greu de scăpat de mirosul său neplăcut.

Însușirea unor corpuri de a nu uda alte corpuri poate avea ca rezultat fenomene interesante. Luați un ac de cusut, ungeți-l cu grăsime și așezați-l cu băgare de seamă culcat pe apă. Acul nu se va scufunda. Privind cu atenție, se poate observa că acul refulează apa și stă liniștit în albia care s-a format. Este suficient însă o ușoară apăsare pentru ca acul să se ducă la fund. Pentru aceasta e necesar ca o parte însemnată din el să se găsească în apă.

Această proprietate interesantă este folosită de insectele plutitoare pe apă, care aleargă repede pe suprafața apei fără să-și ude picioruşele.

Fenomenul de udare se utilizează la îmbogățirea minereurilor prin flotație. Cuvîntul „flotație" înseamnă „plutire la suprafață". Fenomenul constă, în esență, în următoarele. Minereul mărunțit fin se introduce într-un bazin cu apă, se adaugă în acesta o mică cantitate dintr-un ulei special care trebuie să aibă proprietatea de a uda granulele de mineral util și de a nu uda granulele de „steril" (așa se numește partea nefolositoare a minereului). Prin amestecare, granulele de mineral util se acoperă cu o peliculă de ulei.

În terciul subțire format de minereu, apă și ulei se insuflă aer. Se formează astfel o mulțime de băşicuțe de aer, adică spumă. Băşicuțele de aer se ridică la suprafață. Procesul flotației se bazează pe faptul că granulele învăluite în ulei aderă la băşicuțele de aer. O băşicuță relativ mare ridică o granulă mititică în sus, ca un balon sferic.

Mineralul util se ridică cu spuma la suprafață, dar roca sterilă rămîne la fund. Se scoate spuma și se trimite la prelucrare mai departe pentru a se obține așa-numitul „concentrat", care conține de zeci de ori mai puțin steril.

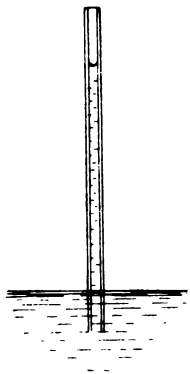


FIG. 84

Forțele de adeziune la suprafețe pot strica egalitatea nivelurilor în vasele comunicante. Este foarte ușor de verificat acest lucru.

Dacă se cufundă un tub capilar de sticlă (cu diametrul de o fracțiune de milimetru) în apă, atunci în contradicție cu principiul vaselor comunicante, apa din acest tub va începe să se ridice repede, iar nivelul ei se va stabili mult mai sus decît într-un vas larg (fig. 84).

Ce s-a întîmplat? Ce forțe susțin greutatea coloanei de lichid care s-a format? Ridicarea apei se datorește forțelor de adeziune a apei la sticlă.

Forțele de adeziune la suprafețe se manifestă în mod vizibil numai atunci cînd lichidul se ridică în tuburi suficient de subțiri. Cu cît un tub are diametrul mai mic, cu atît fenomenul este mai vizibil. Denumirea acestor fenomene superficiale e în legătură cu denumirea tuburilor. Diametrul canalului unui asemenea tub este de cîteva fracțiuni de milimetru; un astfel de tub se numește capilar (ceea ce înseamnă „subțire ca un fir de păr"). Fenomenul ridicării unui lichid în tuburi subțiri se numește capilaritate.

La ce înălțime pot însă ridica tuburile capilare un lichid? S-a constatat că într-un tub cu diametrul de 1 mm, apa se ridică la înălțimea de 1,5 mm. Cînd diametrul este de 0,01 mm, înălțimea la care se va ridica apa crește de atîtea ori de cîte ori s-a micșorat diametrul tubului, adică la 15 cm.

Bineînțeles, ridicarea lichidului este posibilă numai cu condiția ca el să ude pereții tubului. Mercurul nu se ridică în tuburile de sticlă, ci, dimpotrivă, coboară. Mercurul nu poate să „sufere" atingerea sticlei și caută să micșoreze suprafața totală de contact la minimul permis de forța gravitației.

Există multe corpuri care se prezintă în genul unui sistem de tuburi extrem de fine. În aceste corpuri se observă întotdeauna fenomene de capilaritate.

Un întreg sistem de canale lungi și de pori există la plante și la copaci. Diametrele acestor canale sînt mai mici decît o sutime de milimetru. Din această cauză, datorită capilarității, apa din sol se ridică la mare înălțime și se distribuie prin tot corpul plantei.

Un articol foarte util este hîrtia sugativă. Ați făcut o pată de cerneală și trebuie să întoarceți foaia. Desigur că nu veți aștepta pînă ce pata se va usca. Veți lua o bucățică de hîrtie sugativă, veți muia un colț al ei în picătură și cerneala se va urca repede în sus, în contra forței gravitației.

A avut loc un fenomen capilar tipic. Dacă se pune hîrtia sugativă la microscop, se poate vedea structura ei. O astfel de hîrtie constă dintr-o rețea de fibre de hîrtie afînate, formînd între ele canale fine și lungi. Aceste canale joacă rolul de tuburi capilare.

Un sistem similar de pori sau canale lungi formate din fibre există și în fitile. Printr-un fitil se ridică în sus și petrolul în lămpi. Cu ajutorul unui fitil se poate face și un sifon, cufundînd fitilul cu un capăt într-un pahar plin, în așa fel încît celălalt capăt, care trece peste marginea paharului, să se găsească mai jos decît primul (fig. 85).

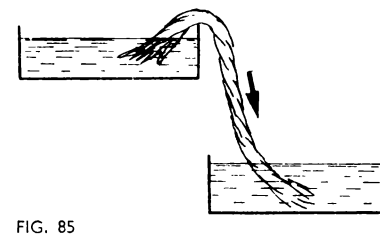


FIG. 85

În tehnologia vopsitoriei se folosește adesea însușirea țesăturilor de a absorbi lichidele prin canalele fine formate de firele țesăturii.

IX
Cărămizile universului

Elementele

Din ce este construită natura înconjurătoare? Primele răspunsuri, care au ajuns pînă la noi, la această întrebare au fost date în Grecia antică acum mai bine de 25 de veacuri.

La prima vedere, aceste răspunsuri par din cale afară de ciudate și ar trebui să consumăm multă hîrtie pentru a explica cititorului logica înțelepților antici — Tales, care afirma că totul constă din apă, Anaximandru, care spunea că lumea este făcută din aer, sau Heraclid, după părerea căruia totul constă din foc.

Absurditatea acestor explicații a obligat pe „iubitorii de înțelepciune" (așa se traduce cuvîntul „filozof") greci mai recenți să mărească numărul de elemente de bază. Empedocle afirma că sînt patru elemente: pămînt, apă, aer și foc. Aristotel a adus acestei concepții corecții definitive (pentru multă vreme).

După Aristotel, toate corpurile constau din una și aceeași substanță, dar această substanță poate căpăta diferite însușiri. Aceste elemente-proprietăți nemateriale sînt în număr de patru: frig, căldură, umiditate și uscăciune. Unindu-se cîte două și fiind împrumutate materiei, aceste elemente-proprietăți ale lui Aristotel formează elementele lui Empedocle. Astfel, materia uscată și rece dă pămîntul, cea uscată și fierbinte dă focul, cea umedă și rece dă apa și, în sfîrșit, cea umedă și caldă dă aerul.

De altfel, din cauza dificultății de a răspunde la o serie de întrebări, filozofii antichității au adăugat la cele patru elemente-proprietăți și „chintesența divină". Aceasta era un fel de zeu-bucătar, care fierbea la un loc diferitele elemente-proprietăți. Prin invocarea unui zeu, bineînțeles, era ușor să se dea o explicație oricărei nedumeriri.

De altfel, multă vreme — aproape pînă în secolul al XVIII-lea — puțini erau aceia care cutezau să fie nedumeriți sau să dea răspunsuri. Doctrina lui Aristotel a fost recunoscută de biserică și a te îndoi de adevărul ei era considerat erezie.

Cu toate acestea s-au ivit astfel de îndoieli. Ele au luat naștere datorită alchimiei.

În vremurile de demult, omul știa că toate corpurile care ne înconjură se pot transforma unele în altele. Arderea, prăjirea minereului, topirea metalelor, toate aceste fenomene erau binecunoscute.

Se părea că aceasta nu contrazice învățătura lui Aristotel. În orice transformare se schimba, ca să spunem așa, „dozajul" elementelor. Dacă toată lumea consta numai din patru elemente, în schimb, posibilitățile de transformare a corpurilor erau, desigur, foarte mari. Era necesar numai să se afle secretul cum să se facă ca din orice corp să se poată obține orice alt corp.

Ce ispititoare idee aceea de a fabrica aur sau a găsi o „piatră filozofală" specială, neobișnuită, care să-i aducă posesorului bogăție, putere și tinerețe veșnică!

Arabii vechi au dat numele de alchimie științei despre fabricarea aurului, a pietrei filozofale și a transformării oricărui corp în oricare altul.

Sute de ani a continuat munca oamenilor care s-au consacrat rezolvării acestei probleme. Alchimiștii n-au izbutit să fabrice aur, nici n-au găsit piatra filozofală, dar în schimb au adunat multe date prețioase despre transformarea corpurilor. În cele din urmă, aceste fapte au dat o lovitură mortală alchimiei. În secolul al XVIII-lea, mulți și-au dat seama că numărul de substanțe de bază sau elemente era incomparabil mai mare de patru. Mercurul, plumbul, sulful, aurul, stibiul (sau antimoniul) erau substanțe care nu se puteau descompune; nu se mai putea spune că aceste substanțe sînt formate din elemente. Dimpotrivă, ele trebuiau numărate printre elementele universului.

În anul 1668, în Anglia a ieșit de sub tipar *Chimistul sceptic sau îndoieli și paradoxuri relative la elementele alchimiștilor* de Robert

Boyle. În această carte găsim o nouă definiție a elementului. El nu mai este elementul nematerial, impalpabil și misterios al alchimiștilor. Acum elementul este materie, o parte componentă a corpului.

Această concepție se încadrează în definiția modernă a noțiunii de element. Lista elementelor dată de Boyle era scurtă. La lista corectă Boyle adăuga și focul. De altfel, ideea elementelor-proprietăți a subzistat și după el. Chiar în lista marelui chimist francez Lavoisier (1743—1794), care este considerat ca întemeietorul chimiei, pe lîngă elementele reale figurează și unele elemente imponderabile: termoforul și substanța luminoasă.

În prima jumătate a secolului al XVIII-lea se cunoșteau 15 elemente, iar la sfîrșitul acelui secol, numărul lor crescuse la 35. Este adevărat că numai 23 dintre ele erau elemente adevărate, restul fiind fie elemente inexistente, fie substanțe compuse, ca soda sau potasa caustică.

La mijlocul secolului al XIX-lea, în manualele de chimie se descriau deja peste 50 de substanțe care nu se puteau descompune.

Un puternic impuls a dat căutărilor conștiente de elemente nedescoperite sistemul periodic al marelui chimist rus Mendeleev. Este prematur de a expune aici acest sistem. Vom spune numai că, prin sistemul său, Mendeleev a stabilit cum trebuie să se caute elementele nedescoperite.

La începutul secolului al XX-lea s-au descoperit toate elementele care se întîlnesc în natură. Numărul lor era de 88.

Atomii

Acum circa 2000 de ani, în Roma antică s-a scris un poem original. Autorul său era poetul roman Lucrețiu Car. *Despre natura lucrurilor* — așa se intitula poemul lui Lucrețiu.

Lucrețiu povestește în versuri concepțiile despre lume ale filozofului antic grec Democrit.

Care erau aceste concepții? Era teoria particulelor extrem de mici, invizibile, din care este constituită toată lumea noastră. Observînd diferitele fenomene, Democrit încerca să le dea o explicație.

Iată, de exemplu, apa. Cînd este încălzită mult, ea se transformă în abur invizibil și se volatilizează. Cum se poate explica acest fenomen? Desigur că această proprietate a apei este în legătură cu structura ei internă.

Sau, de ce, de pildă, simțim mirosul florilor de la distanță?

Meditînd asupra unor astfel de probleme, Democrit a ajuns la convingerea că corpurile doar ni se par masive, dar în realitate ele constau din particule extrem de mici. La diferite corpuri, aceste particule sînt de formă diferită, dar sînt atît de mici, încît este imposibil să fie văzute. De aceea orice corp ni se pare masiv.

Aceste particule extrem de mici, care nu se mai pot divide și din care este constituită apa și toate celelalte corpuri, Democrit le-a numit „atomi", ceea ce pe grecește înseamnă „indivizibili".

Presupunerea remarcabilă a gînditorilor Greciei antice, presupunere care s-a ivit acum 24 de secole, a fost mai tîrziu uitată timp îndelungat. Mai bine de o mie de ani, în lumea savantă a domnit în mod absolut învățătura greșită a lui Aristotel.

Afirmînd că toate substanțele se pot transforma reciproc una într-alta, Aristotel nega categoric existența atomilor. Orice corp se poate diviza la infinit, susținea Aristotel.

În anul 1647, francezul Pierre Gassendi a tipărit o carte în care respingea cu curaj teoria lui Aristotel și afirma că toate substanțele din lume constau din particule indivizibile, adică din atomi. Atomii diferă unii de alții prin forma, mărimea și greutatea lor.

Fiind de acord cu teoria vechilor atomiști, Gassendi a dezvoltat-o mai departe. El a explicat în ce mod apărea și apar în lume milioanele de corpuri diferite din natură. Pentru aceasta, afirma el, nu este nevoie de un număr prea mare de atomi diferiți. Atomul este la fel ca materialul de construcție pentru case. Din trei feluri diferite de materiale de construcție — cărămizi, scînduri și grinzi — se poate construi un număr enorm de case diferite. Tot așa, din mai multe zeci de feluri diferite de atomi, natura poate crea mii de corpuri din cele mai diferite. În fiecare corp, diferiții atomi se unesc în mici grupuri; Gassendi a numit aceste grupuri „molecule", adică „mici mase" (de la cuvîntul latinesc *moles*, care înseamnă masă).

Moleculele diferitelor corpuri se deosebesc una de alta prin numărul și felul („sortul") de atomi din care se compun. Este ușor de imaginat că din cîteva zeci de atomi diferiți se poate crea un număr enorm de combinații diferite, adică de molecule. Iată de ce este atît de mare varietatea de corpuri care ne înconjură.

Totuși o mare parte din concepțiile lui Gassendi erau eronate. Astfel, el credea că există atomi speciali pentru căldură, frig, gust și miros. Ca și ceilalți învățați din acea vreme, el nu se putea elibera complet de influența lui Aristotel și recunoștea elementele nemateriale ale acestuia.

În lucrările lui M.V. Lomonosov — marele iluminist și întemeietor al științei în Rusia — se găsește următoarea idee, care a fost confirmată de experiență mult mai tîrziu.

Lomonosov scrie că molecula poate fi omogenă sau eterogenă. În primul caz, în moleculă se grupează atomi omogeni. În al doilea, molecula constă din atomi diferiți unul de altul. Dacă un corp oarecare este format din molecule omogene, el trebuie considerat corp simplu. Dimpotrivă, dacă corpul constă din molecule construite din atomi diferiți, Lomonosov îl numește mixt.

Acum știm bine că diferitele corpuri din natură au tocmai această structură. În adevăr, să luăm, de exemplu, gazul oxigen; fiecare moleculă a lui conține doi atomi identici de oxigen. Aceasta este molecula unui corp simplu. Dacă însă atomii care formează moleculele sînt diferiți, avem de-a face cu o combinație chimică complexă, „mixtă". Moleculele sale constau din atomii acelor elemente chimice din care este formată această combinație.

Se poate spune și altfel: fiecare substanță simplă este alcătuită din atomii unui singur element chimic; o substanță compusă cuprinde atomi a două sau mai multe elemente.

Unii gînditori vorbeau despre atomi, aducînd argumente logice în sprijinul existenței lor. Cel care a introdus cu adevărat atomii în știință și a făcut din ei un obiect de cercetări a fost savantul englez Dalton. Dalton a arătat că există legi chimice care se pot explica în mod natural numai cu ajutorul noțiunii de atom.

După Dalton, atomii au cucerit un loc solid în știință, dar încă multă vreme s-au găsit oameni de știință care „nu credeau în atomi". Unul dintre ei scria, chiar la sfîrșitul secolului trecut, că peste cîteva zeci de ani „nu se vor mai găsi atomi decît în praful bibliotecilor".

Acum astfel de opinii par deplasate. Astăzi știm atîtea amănunte despre „viața" atomului, încît a ne îndoi de existența lui este ca și cum am pune sub semnul întrebării existența Mării Negre.

Masele relative ale atomilor au fost determinate de chimiști. La început s-a adoptat ca unitate de masă atomică masa atomului de hidrogen. Masa atomică relativă (sau, impropriu, greutatea atomică) a azotului era egală aproximativ cu 14, a oxigenului — aproximativ cu 16, a clorului — aproximativ cu 35,5. Întrucît combinațiile oxigenului sînt mai răspîndite, s-a ales ulterior alt sistem de unități relativ puțin diferite, de masă atomică, în care numărul 16,000 a fost atribuit oxigenului. Masa atomică a hidrogenului este egală, în acest sistem, cu 1,008*.

* Deoarece combinațiile chimice cele mai numeroase și mai răspîndite sînt cele ale carbonului, în prezent s-a ales ca unitate de masă atomică a douăsprezecea parte din masa izotopului de carbon-12 — *N. R.*

În urma unor experiențe interesante, fizicienii au reușit să măsoare masele absolute ale atomilor. Întrucît masele relative sînt cunoscute, este suficient să se măsoare în grame masa atomului unui element oarecare, de pildă, a atomului de hidrogen.

Bineînțeles că fizicienii nu au construit o balanță pe care să se pună un atom și să se echilibreze cu o greutate mică de metal. Pentru determinarea masei atomului, fizicienii s-au servit de alte măsurări cu nimic mai puțin demne de încredere decît cîntărirea directă.

S-a găsit că unitatea atomică de masă (amu*) este

$$1 \text{ amu} = 1{,}66 \cdot 10^{-24} \text{ g}.$$

Pentru a vă face o idee de cît de mică este această cifră, închipuiți-vă că de la fiecare om de pe globul pămîntesc (populația Pămîntului este de peste 2 miliarde) cereți cîte un miliard de molecule. Știți cîtă materie veți aduna în modul acesta? Cîteva milionimi de gram.

Sau faceți următoarea comparație: globul pămîntesc este de atîtea ori mai greu decît un măr de cîte ori mărul este mai greu decît un atom de hidrogen.

Inversul unității atomice de masă se numește numărul lui Avogadro:

$$N = \frac{1}{1 \text{ amu}} = 6{,}023 \cdot 10^{23}.$$

Acest număr enorm are următorul înțeles. Să luăm o cantitate de materie în așa fel, încît numărul de grame să fie egal cu masa relativă M a atomului sau a moleculei. Această cantitate se numește atom-gram sau moleculă-gram (adesea, pentru simplificare, în loc de „moleculă-gram" se spune „mol"). Masa unei molecule în grame este egală cu $M \cdot 1$ amu. De aceea, numărul de molecule dintr-o moleculă-gram a unui element oarecare este

$$\frac{M}{M \cdot 1 \text{ amu}} = N,$$

adică este egal cu numărul lui Avogadro.

---

* Sînt inițialele de la cuvintele expresiei englezești „*Atomic mass unit*" (adică unitate atomică de masă). — *N.R.*

Ce este căldura

Prin ce se deosebește un corp cald de unul rece? Pînă la începutul secolului al XIX-lea, la această întrebare se răspundea astfel: un corp cald conține mai mult termogen (sau termofor) decît unul rece, adică absolut ca o supă, care e mai sărată dacă conține mai multă sare. Dar ce este termogenul? La această întrebare urma răspunsul: „termogenul este materie călduroasă, este focul elementar". Misterios și greu de înțeles. În fond, acest răspuns este ca următoarea definiție a funiei: „Funia este o simplă frînghie".

Pe lîngă teoria termogenului mai dăinuia de multă vreme o altă concepție asupra naturii căldurii. Ea a fost susținută cu multă strălucire de numeroși oameni de știință din secolele XVI, XVII și XVIII.

Francis Bacon, în cartea sa *Novum organum*, scria: „Căldura însăși nu este în esență altceva decît mișcare. Căldura constă din mișcarea alternativă a părților extrem de mici ale unui corp".

Robert Hook, în cartea *Micrografia*, afirma: „Căldura este mișcarea neîncetată a părților unui corp. Nu există corpuri ale căror particule să fie în repaus".

Afirmații deosebit de clare de acest gen găsim la Lomonosov (anul 1745), în lucrarea sa *Cugetări despre cauza căldurii și a frigului*. În această lucrare se neagă existența termogenului și se spune că „căldura constă din mișcarea internă a particulelor de materie".

Foarte plastic spunea Rumford la sfîrșitul secolului al XVIII-lea: „Un corp este cu atît mai cald cu cît particulele din care este constituit se mișcă mai intens, așa cum un clopot sună cu atît mai tare cu cît se mișcă mai tare".

În aceste presupuneri remarcabile, care sînt atît de avansate față de vremea respectivă, se ascund bazele concepției moderne asupra naturii căldurii.

Uneori avem zile liniștite, senine și fără vînt. Frunzele copacilor au amorțit, nici cele mai mici încrețituri nu apar pe luciul apei. Tot ceea ce ne înconjură încremenește într-o severă și solemnă imobilitate. Lumea vizibilă este în repaus. Dar ce se petrece în lumea atomilor și a moleculelor?

Fizica din ziua de azi poate povesti multe despre atom. Mișcarea invizibilă a particulelor din care este clădită lumea nu încetează niciodată, în nici o condiție.

De ce însă nu vedem toate aceste mișcări? Particulele se mișcă, dar corpul stă în repaus. Cum este posibil așa ceva?

Nu vi s-a întîmplat să observați vreodată un roi de muscuțe? Roiul pare că plutește în aerul pe care nu-l mișcă nici o adiere,

dar în interiorul roiului pulsează o viață intensă. Sute de insecte se reped spre dreapta, dar în același timp tot atîtea se reped spre stînga, însă roiul întreg rămîne pe loc fără a-și schimba forma.

Mișcările invizibile ale atomilor și moleculelor au același caracter haotic, dezordonat. Dacă niscaiva molecule ies din spațiul ocupat de corp, locul lor este ocupat de altele. Dar întrucît noile venite nu se deosebesc cu nimic de moleculele fugare, corpul rămîne așa cum a fost. Mișcarea dezordonată, haotică a particulelor nu modifică proprietățile lumii vizibile.

Cititorul poate însă întreba: oare această discuție nu este inutilă? Aceste raționamente, fie ele chiar frumoase, prin ce sînt mai convingătoare decît teoria termogenului? A văzut cineva mișcarea termică veșnică a particulelor de materie?

Mișcarea termică a particulelor se poate vedea, și anume cu ajutorul celui mai modest microscop. Primul care a observat acest fenomen, acum o sută de ani în urmă, a fost botanistul englez Brown.

Examinînd la microscop structura internă a plantelor, el a observat că particulele extrem de mici de materie care plutesc în seva plantelor se mișcă neîncetat în toate direcțiile. Botanistul s-a întrebat: ce forțe silesc particulele să se miște? Poate niște ființe vii? Savantul s-a hotărît să examineze la microscop particulele foarte mici de argilă care plutesc într-o apă tulbure. Nici aceste particule, indiscutabil lipsite de viață, nu se găseau în stare de repaus, ci erau cuprinse de o mișcare haotică neîntreruptă. Cu cît particulele erau mai mici, cu atît se mișcau mai repede.

Botanistul a examinat această picătură de apă multă vreme, dar n-a putut aștepta pînă cînd mișcarea particulelor va înceta; parcă niște forțe invizibile le împingeau mereu.

Mișcarea browniană a particulelor este tocmai mișcarea termică. Particulele mari și mici, grupurile de molecule, moleculele izolate și atomii, toate au proprietatea de mișcare termică.

Energia se conservă întotdeauna

Așadar, lumea este constituită din atomi în mișcare. Atomii au masă, iar un atom în mișcare posedă energie cinetică. Desigur, masa unui atom este neînchipuit de mică și de aceea și energia lui va fi infimă, dar numărul de atomi este de miliarde de miliarde.

Acum amintim cititorului că, deși am vorbit de legea conservării energiei, aceasta nu era o lege destul de universală. Impulsul și

momentul se conservau în practică, pe cînd energia se conserva numai în cazul ideal cînd nu exista frecare. În realitate însă, energia se micșora întotdeauna.

Dar atunci n-am spus nimic despre energia atomilor. Este natural să se nască această idee: acolo unde la prima vedere am observat o scădere a energiei, de fapt energia era transmisă, într-un mod pe care ochiul nu-l vedea, la atomii corpului.

Atomii se supun legilor mecanicii. Este drept că mecanica lor este ceva mai specială, dar aceasta nu schimbă situația, căci în privința legii conservării energiei mecanice, atomii nu se deosebesc prin nimic de corpurile mari.

Așadar, conservarea completă a energiei se manifestă numai atunci cînd, pe lîngă energia mecanică a unui corp, avem în vedere și energia internă a respectivului corp și a mediului ambiant. Numai în acest caz legea este universală.

Din ce se compune însă energia totală a unui corp? Prima componentă a ei, de fapt, am menționat-o deja: este suma energiilor cinetice ale tuturor atomilor. Nu trebuie însă să se uite nici faptul că atomii interacționează unii cu alții. Așadar, se adaugă și energia potențială a acestei interacțiuni. Deci energia totală a unui corp este egală cu suma energiilor cinetice ale particulelor lui și a energiei potențiale a interacțiunii dintre acestea.

Este simplu de înțeles că energia mecanică a unui corp, luat ca un tot, este numai o parte din energia totală, căci atunci cînd corpul se află în repaus, moleculele sale nu se opresc pe loc și nu încetează de a interacționa una cu alta. Energia mișcării termice a particulelor, cu care rămîne un corp aflat în repaus, și energia de interacțiune a particulelor formează energia internă a corpului. De aceea, energia totală a unui corp este egală cu suma dintre energia mecanică și energia internă.

În energia mecanică a unui corp, luat ca un tot, se cuprinde și energia gravitațională, adică energia potențială de interacțiune a particulelor corpului cu globul pămîntesc.

Dacă examinăm energia internă, nu constatăm pierderi de energie. Dacă am privi printr-o lentilă care mărește de milioane de ori, imaginea care ni s-ar oferi este cît se poate de armonioasă. Nu există nici o pierdere de energie mecanică, ci numai o transformare a acesteia în energie internă a corpului sau a mediului. S-a pierdut, poate lucru mecanic? Nu! Energia s-a folosit pentru accelerarea mișcării relative a moleculelor sau pentru modificarea poziției lor reciproce.

Moleculele se supun legii conservării energiei mecanice. În lumea moleculelor nu există forțe de frecare; lumea moleculelor

este condusă de transformările energiei potențiale în energie cinetică și invers. Numai în lumea macroscopică, a lucrurilor mari, unde nu se observă moleculele, energia „se pierde".

Dacă într-un fenomen oarecare, energia mecanică se pierde complet sau în parte, cu aceeași cantitate crește energia internă a corpurilor și a mediului care iau parte la acel fenomen. Cu alte cuvinte, energia mecanică se transformă fără nici o pierdere în energie a moleculelor sau a atomilor.

Legea conservării energiei este cel mai sever contabil al fizicii. În orice fenomen, activul și pasivul trebuie să coincidă precis. Dacă acest lucru nu se realizează în vreo experiență, înseamnă că ceva important a scăpat atenției noastre. În acest caz, legea conservării energiei dă semnalul: cercetătorule, repetă experiența, mărește precizia măsurărilor, caută cauza pierderilor! În modul acesta, fizicienii au făcut noi descoperiri importante și s-au convins din ce în ce mai mult de justețea absolut riguroasă a acestei legi remarcabile.

Caloria

Avem deja două unități de energie: ergul și kilogramul-forță-metru. S-ar părea că este suficient. Totuși, cînd se studiază fenomene termice, se folosește prin tradiție și o a treia unitate — caloria.

Vom vedea mai tîrziu că nici caloria nu este ultima de pe lista unităților adoptate pentru măsurarea energiei.

Se poate ca, în fiecare caz în parte, folosirea unității „proprii" de energie să fie comodă și rațională, dar în orice exemplu cît de cît mai complicat în legătură cu transformarea energiei dintr-o formă în alta se nasc confuzii inimaginabile de unități.

Pentru a simplifica calculele, noul sistem de unități SI prevede o singură unitate pentru lucru mecanic, energie și cantitate de căldură, și anume joule-ul (vezi pag. 87). Totuși, avînd în vedere tradiția și timpul necesar pentru ca noul sistem de unități să fie întrebuințat de toată lumea și să devină unicul sistem, este bine să facem cunoștință mai de aproape cu unitatea de cantitate de căldură pe cale de dispariție, numită calorie.

O calorie mică (cal) este cantitatea de energie necesară unei cantități de 1 g de apă pentru a-și ridica temperatura cu 1°C.

Trebuie menționat cuvîntul „mică", deoarece uneori se folosește caloria „mare", care este de o mie de ori mai mare decît

unitatea aleasă (adesea caloria mare se notează cu kcal, ceea ce înseamnă „kilocalorie").

Legătura cantitativă dintre calorie și unitățile mecanice erg și kilogram-forță-metru se găsește încălzind apa pe cale mecanică. Asemenea experiențe s-au făcut de repetate ori. Se poate ridica temperatura apei, de exemplu, prin agitare energică. Lucrul mecanic cheltuit pentru încălzirea apei se evaluează destul de precis. Prin astfel de măsurări s-a găsit că

$$1 \text{ cal} = 0{,}427 \text{ kgf} \cdot \text{m} = 4{,}18 \text{ J}.$$

Întrucît unitățile de energie și de lucru mecanic sînt aceleași, tot în calorii se poate măsura și lucrul mecanic. Pentru ridicarea unei mase de 1 kg la înălțimea de 1 m, trebuie să se cheltuiască 2,35 calorii. Acest lucru sună neobișnuit și chiar este incomod de comparat ridicarea unei mase cu încălzirea apei. De aceea, în mecanică nu se face uz de calorii.

Puțină istorie

Legea conservării energiei a putut fi formulată numai atunci cînd ideile despre natura mecanică a căldurii au devenit suficient de clare și cînd tehnica a ridicat problema importantă din punct de vedere practic a echivalenței dintre căldură și lucru mecanic.

Prima experiență pentru stabilirea relației cantitative dintre căldură și lucru mecanic a fost făcută de celebrul fizician Rumford (1768—1814). El lucra într-o fabrică în care se făceau tunuri. Cînd se găurea țeava de tun, se degaja căldură. Cum se putea măsura această căldură? Ce unitate de măsură a căldurii trebuia adoptată? Rumford a avut ideea să pună lucrul mecanic efectuat în timpul găuririi în legătură cu ridicarea temperaturii unei cantități oarecare de apă cu un număr oarecare de grade. În aceste cercetări s-a exprimat, poate pentru prima oară în mod clar, ideea că lucrul mecanic și căldura trebuie să aibă o unitate comună de măsură.

Pasul următor spre descoperirea legii conservării energiei a fost stabilirea următorului fapt important: dispariția lucrului mecanic este însoțită de apariția unei cantități proporționale de căldură; așa s-a găsit unitatea comună de măsură a căldurii și a lucrului mecanic.

Determinarea inițială a așa-numitului echivalent mecanic al căldurii a fost făcută de fizicianul francez Sadi Carnot. Acest om

eminent a decedat în vîrstă de 36 ani, în anul 1832, și a lăsat după moarte un manuscris, care a fost publicat abia după 50 de ani de la moartea sa. Descoperirea făcută de Carnot a rămas necunoscută și nu a influențat dezvoltarea științei. În această lucrare, Carnot calcula că pentru a ridica 1 m^3 apă la o înălțime de 1 m este necesară aceeași energie ca pentru a încălzi 1 kg apă cu 2,7°C (cifra corectă este 2,3°).

În anul 1842 își publică prima sa lucrare medicul Julius Robert Mayer din Heilbronn. Deși Mayer numește cu totul altfel noțiunile fizice pe care le cunoaștem, totuși citirea cu atenție a lucrării lui duce la concluzia că în ea sînt expuse trăsăturile esențiale ale legii conservării energiei. Mayer face distincție între energia internă („calorică"), energia potențială a gravitației și energia de mișcare a unui corp. El încearcă să deducă din raționamente pur speculative caracterul obligatoriu al conservării energiei în timpul diferitelor transformări ale ei. Pentru a verifica această afirmație prin experiență, trebuie să existe o unitate comună de măsură a acestor energii. Mayer calculează că încălzirea unui kilogram de apă cu un grad este echivalentă cu ridicarea unui kilogram la înălțimea de 365 m.

În a doua lucrare a sa, publicată cu trei ani mai tîrziu, Mayer relevă caracterul universal al legii conservării energiei și posibilitatea de a fi aplicată la problemele chimiei, biologiei și la fenomenele cosmice. La diferitele forme de energie, Mayer adaugă energia magnetică, electrică și chimică.

În descoperirea legii conservării energiei, un mare merit îi revine remarcabilului fizician englez (fabricant de bere la Salford în Anglia) James Prescott Joule, care a lucrat independent de Mayer.

Dacă pentru Mayer este caracteristică înclinarea spre o vagă filozofie, principala trăsătură a lui Joule este abordarea riguros experimental a fenomenelor de care se ocupă. Joule își punea diverse probleme și căpăta un răspuns la ele prin experiențe speciale făcute cu o atenție extraordinară. Indiscutabil că în toată seria de experiențe făcute de el, Joule s-a condus după o singură idee: să găsească o unitate comună de măsură a efectelor calorice, electrice și mecanice și să arate că, în toate aceste fenomene, energia se conservă. Joule și-a formulat ideea astfel: „În natură nu se produce anihilarea unei forțe care efectuează un lucru mecanic, fără a se produce un efect corespunzător".

Prima lucrare a lui Joule a fost prezentată de el la 24 ianuarie 1843, iar la 21 august același an, Joule a prezentat rezultatele sale asupra stabilirii unei unități comune de măsură a căldurii

HERMANN HELMHOLTZ (1821—1894) — celebru savant german Helmholtz a lucrat cu mare succes în domeniul fizicii, matematicii și fiziologiei. El a făcut pentru prima oară (în 1847) studiul matematic al legii conservării energiei, subliniind caracterul universal al acestei legi. Helmholtz a obținut rezultate remarcabile în termodinamică; el a aplicat pentru prima oară această teorie la studiul proceselor chimice.

Prin lucrările sale asupra mișcării turbionare a lichidelor, Helmholtz a pus bazele hidrodinamicii și ale aerodinamicii. El a făcut o serie de cercetări prețioase în domeniul acusticii și al electromagnetismului. Helmholtz a dezvoltat teoria fizică a muzicii. În cercetările sale de fizică, el a aplicat metode matematice eficace și originale.

și a lucrului mecanic. Încălzirea unui kilogram de apă cu un grad era echivalentă cu ridicarea unui kilogram la înălțimea de 460 m.

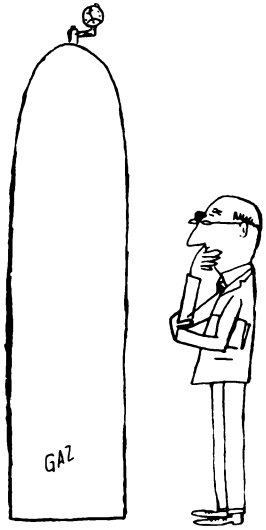
În anii următori, Joule și o serie de alți cercetători au depus multă muncă pentru a preciza valoarea echivalentului caloric al lucrului mecanic și s-au străduit să demonstreze caracterul absolut universal al acestui echivalent. Cu puțin înainte de anul 1850, a devenit clar că în orice mod s-ar transforma lucrul mecanic în căldură, cantitatea de căldură care ia naștere este întotdeauna proporțională cu lucrul mecanic cheltuit. Cu toate că Joule a fundamentat experimental legea conservării energiei, el nu a dat în lucrările sale o formulare limpede a acestei legi.

Acest merit revine fizicianului german Helmholtz. La 23 iulie 1847, la ședința Societății de fizică din Berlin, Hermann Helmholtz a citit comunicarea sa despre principiul conservării energiei. În această lucrare erau expuse pentru prima oară, în mod clar, bazele mecanice ale legii conservării energiei. Lumea este constituită din atomi, iar atomii posedă energie potențială și cinetică. Suma energiilor potențiale și cinetice ale particulelor din care este format un corp sau un sistem nu poate varia, dacă acest corp sau sistem nu este supus la influențe exterioare. Legea conservării a fost formulată pentru prima oară de Helmholtz, așa cum am expus-o cu cîteva pagini mai înainte.

Marele aport al lui Helmholtz nu constă numai în formularea unor idei generale. Helmholtz a analizat amănunțit toate fenomenele fizice — calorice, electromagnetice și chimice — , a arătat caracterul universal al principiului echivalenței și a dat regulile de calcul al energiei.

După lucrările lui Helmholtz n-a mai rămas celorlalți fizicieni decît să verifice și să aplice principiul conservării energiei. Succesul tuturor acestor cercetări a condus, cu puțin timp înainte de anul 1860, la concluzia că legea conservării energiei este general acceptată ca lege fundamentală a științelor naturale.

Încă de la începutul secolului al XX-lea s-au observat fenomene care puneau la îndoială legea conservării energiei, dar ulterior divergențele aparente și-au găsit explicația. Legea conservării energiei a ieșit întotdeauna, pînă acum, cu cinste din toate încercările.



X

Structura materiei

Moleculele

Moleculele constau din atomi. Atomii sînt legați în molecule prin forțe care se numesc forțe chimice (moleculare).

Există molecule formate din doi, trei, patru sau mai mulți atomi. Moleculele cele mai mari — ale albuminelor — constau din zeci și chiar sute de mii de atomi.

Împărțirea moleculelor este extraordinar de variată. Pînă în prezent, chimiștii au separat din substanțele naturale sau au creat în laborator milioane de substanțe formate din molecule diferite.

Proprietățile moleculelor sînt determinate nu numai de numărul de atomi de un fel sau altul care fac parte din structura lor, ci și de ordinea și configurația legăturilor lor. Molecula nu este o îngrămădire de cărămizi, ci o construcție arhitecturală complicată, în care fiecare cărămidă își are locul ei și vecinii ei perfect determinați. Edificiul atomic care formează o moleculă poate fi rigid într-o măsură mai mare sau mai mică. În orice caz, fiecare atom efectuează oscilații în jurul poziției sale de echilibru. În unele cazuri, însă, unele părți ale moleculei se pot roti în raport cu alte părți, dînd moleculei libere, în cursul mișcării sale termice, diferite configurații dintre cele mai bizare.

Să analizăm mai amănunțit interacțiunea atomilor. În fig. 86 este reprezentată curba energiei potențiale a unei molecule formate

din doi atomi. Ea are o formă caracteristică: mai întîi merge în jos, apoi se încovoaie, formînd o „groapă" și după aceea se apropie încet de axa orizontală, pe care este luată distanța dintre atomi.

Știm că este stabilă starea în care energia potențială are valoarea minimă. Cînd un atom face parte dintr-o moleculă, el „stă" în groapa de potențial, executînd mici oscilații termice în jurul poziției de echilibru.

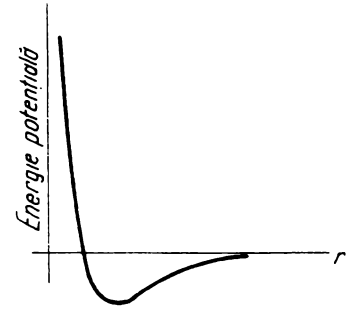


FIG. 86

Distanța de la axa verticală pînă la fundul gropii de potențial se poate numi distanță de echilibru. La această distanță s-ar așeza atomii dacă mișcarea termică ar înceta.

Curba energiei potențiale dă toate amănuntele despre interacțiunea atomilor. Dacă particulele se atrag sau se resping la o anumită distanță sau la alta, dacă scade sau crește forța de interacțiune cînd particulele se depărtează sau se apropie una de alta,—toate aceste informații se pot obține din analiza curbei energiei potențiale. Punctele de la stînga „fundului gropii" corespund respingerii. Dimpotrivă, porțiunile de curbă de la dreapta fundului gropii caracterizează atracția. Informații prețioase dă și panta curbei: cu cît curba are o pantă mai mare. cu atît forța este mai mare.

Găsindu-se la distanțe mari, atomii se atrag unul pe altul; forța de atracție scade repede cînd distanța dintre ei crește. Dacă atomii se apropie, forța de atracție crește și atinge valoarea maximă cînd atomii se apropie foarte mult unul de altul. Dacă atomii se apropie și mai mult, atracția slăbește și, în sfîrșit, la distanța de echilibru, forța de interacțiune devine egală cu zero. Cînd atomii se apropie la o distanță mai mică decît cea de echilibru, apar forțe de respingere, care cresc brusc și fac foarte repede ca micșorarea mai departe a distanței să fie practic imposibilă.

Distanțele de echilibru (mai departe vom spune mai scurt — distanțele) dintre atomi sînt diferite la diferitele feluri de atomi.

Pentru perechi diferite de atomi diferă nu numai distanțele de la axa verticală pînă la fundul gropii, ci și adîncimea gropilor.

Adîncimea gropii are o semnificație simplă: pentru ca un atom să iasă din groapă este necesară o energie egală tocmai cu

această adîncime. De aceea, adîncimea gropii se poate numi energie de legătură a particulelor. Distanțele dintre atomii moleculelor sînt atît de mici, încît pentru măsurarea lor trebuie să se aleagă unități potrivite, căci altfel valorile lor ar trebui să se exprime, de pildă, sub forma următoare: 0,000 000 012 cm. Aceasta este valoarea pentru molecula de oxigen.

Deosebit de comodă pentru descrierea lumii atomilor este unitatea numită angström (e drept că numele savantului suedez cu care s-a botezat această unitate se citește corect *Ongström*; în amintirea acestui lucru, deasupra literei A se pune un cerculeț):

$$1\,\text{Å} = 10^{-8}\text{cm},$$

adică a suta milioana parte dintr-un centimetru.

Distanța dintre atomii moleculelor este cuprinsă între 1 și 4 angströmi. Distanța de echilibru scrisă mai înainte pentru oxigen este egală cu 1,2 Å.

După cum se vede, distanțele dintre atomi sînt foarte mici. Dacă am înconjura globul pămîntesc cu o sfoară la ecuator, lungimea acestui „brîu" ar fi de atîtea ori mai mare decît lățimea palmei noastre de cîte ori lățimea palmei este mai mare decît distanța dintre atomii unei molecule.

Pentru măsurarea energiei de legătură se folosește de obicei caloria, dar ea nu se raportează la o moleculă, ceea ce ar da, bineînțeles, o cifră infimă, ci la o moleculă-gram, adică la numărul de grame egal cu masa moleculară relativă.

Dacă se împarte energia de legătură pe molecula-gram la numărul lui Avogadro, $N = 6{,}023 \cdot 10^{23}$, se găsește energia de legătură a unei molecule.

Energia de legătură a atomilor în moleculă, ca și distanțele dintre atomi, variază în limite neînsemnate.

Tot pentru oxigen, energia de legătură este egală cu 116 000 cal pe moleculă-gram, pentru hidrogen ea este de 103 000 cal etc.

Am spus deja că atomii se așază în molecule într-un mod perfect determinat unii față de alții, formînd în cazurile mai complicate structuri foarte complexe.

Vom da cîteva exemple simple. În molecula de CO_2 (bioxid de carbon), toți trei atomii sînt așezați pe un rînd, cu atomul de carbon la mijloc. Molecula de apă H_2O are formă de unghi, în vîrful unghiului (el este egal cu 105°) găsindu-se atomul de oxigen.

În molecula de amoniac NH_3, atomul de azot se găsește în vîrful unei piramide cu trei fețe; în molecula de metan CH_4,

atomul de carbon se găsește în centrul unei figuri cu patru fețe, cu laturile egale, care se numește tetraedru.

Atomii de carbon ai benzenului C_6H_6 formează un hexagon regulat. Legăturile atomilor de carbon cu cei de hidrogen pleacă din toate vîrfurile hexagonului. Toți atomii sînt situați în același plan.

Schemele aranjamentului atomilor acestor molecule sînt reprezentate în fig. 87 și 88. Liniile simbolizează legăturile.

A avut loc o reacție chimică; moleculele de un fel au dispărut și s-au format

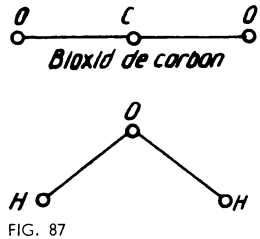


FIG. 87

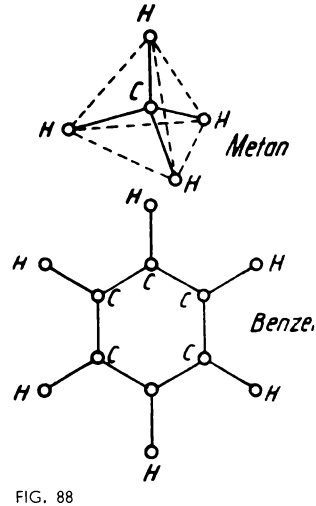


FIG. 88

altele. Unele legături s-au rupt și au apărut altele noi. Pentru ruperea legăturilor dintre atomi — amintiți-vă figura — este necesar să se cheltuiască același lucru mecanic ca în cazul scoaterii unei bile dintr-o groapă. Dimpotrivă, cînd se formează legături noi, se degajează energie — bila se rostogolește în groapă.

Care este mai mare? Lucrul mecanic de rupere sau lucrul mecanic de creare a legăturii? În natură întîlnim reacții chimice de ambele tipuri.

Surplusul de energie se numește efect termic sau, mai scurt, căldură de reacție (sau de transformare). Efectele termice ale reacțiilor sînt în majoritatea cazurilor de ordinul a zeci de mii de calorii, cînd calculul se face pentru un mol. De foarte multe ori, efectul termic figurează ca unul din termenii formulei reacției.

De exemplu, reacția de ardere a carbonului sub formă de grafit, adică combinarea lui cu oxigenul, se scrie astfel:

$$C + O_2 = CO_2 + 94\ 250 \text{ cal.}$$

Aceasta înseamnă că prin combinarea C cu O_2, se degajează o energie de 94 250 cal.

Suma dintre energia internă a unui atom-gram de carbon din grafit și energia internă a unei molecule-gram de oxigen este egală cu energia internă a unei molecule-gram de bioxid de carbon plus 94 250 cal.

Așadar, asemenea expresii matematice au sensul unor egalități algebrice scrise pentru valorile energiilor interne.

Cu ajutorul acestor ecuații se pot găsi efectele termice ale transformărilor la care, dintr-un motiv oarecare, nu se pot aplica metodele directe de măsurare. Iată un exemplu: dacă carbonul (grafitul) se combină cu hidrogenul, se formează acetilenă (gaz):

$$2C + H_2 = C_2H_2.$$

Reacția nu se desfășoară, însă în modul acesta. Totuși, se poate afla efectul termic al ei. Vom scrie următoarele trei reacții cunoscute:

oxidarea carbonului

$$2C + 2O_2 = 2CO_2 + 188\,000,$$

oxidarea hidrogenului

$$H_2 + \frac{1}{2} O_2 = H_2O + 68\,000,$$

oxidarea acetilenei

$$C_2H_2 + \frac{5}{2} O_2 = 2CO_2 + H_2O + 312\,000.$$

Toate aceste egalități se pot considera ca ecuații ale energiilor de legătură ale moleculelor. Dacă este așa, atunci se poate opera cu ele ca cu niște egalități algebrice. Scăzînd pe cele două de sus din cea de jos, obținem

$$2C + H_2 = C_2H_2 - 56\,000.$$

Așadar, transformarea care ne interesează este însoțită de absorbția a 56 000 cal pe fiecare moleculă-gram.

Interacțiunea moleculelor

Moleculele se atrag reciproc; în această privință nu încape nici o îndoială. Dacă la un moment oarecare moleculele ar înceta să se atragă una pe alta, toate corpurile lichide și solide s-ar descompune în molecule.

Moleculele se resping reciproc și acest lucru este, de asemenea, neîndoios, căci altminteri lichidele și corpurile solide s-ar comprima cu o ușurință neobișnuită.

Între molecule acționează forțe în multe privințe asemănătoare forțelor dintre atomi, despre care s-a vorbit mai înainte. Curba energiei potențiale de care ne-am servit pentru atomi redă corect trăsăturile fundamentale ale interacțiunii moleculelor. Totuși între aceste interacțiuni există și diferențe substanțiale.

Să comparăm, de exemplu, distanța de echilibru dintre atomii de oxigen care formează o moleculă și dintre atomii de oxigen a două molecule vecine, care s-au atras în oxigenul solidificat pînă la poziția de echilibru. Diferența este foarte sensibilă: atomii de oxigen care formează o moleculă se stabilesc la distanța de 1,2 Å, iar atomii de oxigen din molecule diferite se apropie unul de altul pînă la 2,9 Å.

Asemenea rezultate se obțin și pentru alți atomi. Atomii moleculelor străine se așază la distanțe mai mari unul de altul decît atomii aceleiași molecule. De aceea, este mai ușor să se despartă moleculele una de alta decît să se desfacă atomii dintr-o moleculă, diferența dintre energiile respective fiind mult mai mare decît diferența dintre distanțe. Dacă energia necesară pentru ruperea legăturii dintre atomii de oxigen care formează o moleculă este de circa 100 kcal/mol, energia de separare a moleculelor de oxigen este mai mică de 2 kcal/mol.

Așadar, pe curba energiei potențiale a moleculelor, „groapa" este situată mai departe de axa verticală și, în afară de aceasta, „groapa" este mult mai puțin adîncă.

Cu aceasta însă nu s-au terminat diferențele dintre interacțiunile atomilor care formează o moleculă și interacțiunile moleculelor.

Chimiștii au arătat că atomii se leagă în moleculă într-un număr perfect determinat cu alți atomi. Dacă doi atomi de hidrogen au format o moleculă, al treilea atom nu se mai unește cu ei în acest scop. În molecula de apă, un atom de oxigen este legat cu doi atomi de hidrogen și este imposibil să se mai adauge încă unul.

În interacțiunile moleculare nu găsim nimic asemănător. Atrăgînd la sine o vecină, molecula nu-și pierde nicidecum „forța de atracție" de care dispunea. Apropierea moleculelor vecine va continua atîta timp cît permite spațiul disponibil.

Ce înseamnă „cît permite spațiul"? Oare moleculele sînt ca niște mere sau ouă? Desigur, într-un fel, această comparație este

justă: moleculele sînt corpuri fizice avînd anumite „dimensiuni" și „forme". Distanța de echilibru dintre molecule nu este altceva decît „dimensiunea" moleculelor.

Cum se prezintă mișcarea termică

Interacțiunea moleculelor poate avea o importanță mai mare sau mai mică în „viața" moleculelor.

Cele trei stări — gazoasă, lichidă și solidă — diferă una de alta prin rolul pe care-l joacă în ele interacțiunea moleculelor.

Cuvîntul „gaz" a fost născocit de oamenii de știință. Originea sa este cuvîntul grecesc „haos", care înseamnă dezordine.

În adevăr, starea gazoasă a substanței este un exemplu al dezordinii totale și absolute care există în natură în ce privește poziția și mișcarea particulelor. Nu există microscop care să permită să se vadă mișcarea moleculelor gazoase, dar, cu toate acestea, fizicienii pot descrie destul de amănunțit viața acestei lumi invizibile.

Într-un centimetru cub de apă, la temperatura camerei și la presiune atmosferică normală, se găsește un număr enorm de molecule: aproximativ $2{,}5 \cdot 10^{19}$ (adică 25 de miliarde de miliarde de molecule). Fiecărei molecule îi revine un volum de $4 \cdot 10^{-20}$ cm^3, adică un cubuleț cu latura de aproximativ $3{,}5 \cdot 10^{-7}$ cm = 35Å. Dar moleculele sînt foarte mici. De exemplu, moleculele de oxigen și de azot, care formează partea principală a aerului, au o dimensiune medie de circa 4 Å.

Așadar, distanța medie dintre molecule este de 10 ori mai mare decît dimensiunile moleculei. Aceasta înseamnă că volumul mediu de aer care revine unei molecule este de aproximativ 1 000 de ori mai mare decît volumul moleculei însăși.

Închipuiți-vă un teren neted pe care sînt risipite în dezordine monede, pe fiecare metru pătrat revenind în medie cîte 100 de monede. Aceasta înseamnă una sau două monede pe o suprafață cît pagina cărții pe care o citiți. Moleculele de gaz sînt aproximativ tot așa de rare ca aceste monede.

Fiecare moleculă de gaz se găsește în stare de mișcare termică neîncetată.

Să urmărim o moleculă. Ea se mișcă repede într-o direcție oarecare spre dreapta. Dacă nu ar întîlni în calea ei nici un obstacol, molecula ar continua mișcarea ei cu aceeași viteză pe o linie dreaptă. Dar numeroasele ei vecine intersectează drumul mole-

culei. Ciocnirile sînt inevitabile și moleculele ricoșează ca bilele de biliard care se ciocnesc. În ce parte va sări molecula respectivă? Va cîștiga sau va pierde din viteza ei? Totul este posibil, căci întîlniri pot fi dintre cele mai diferite. Sînt posibile ciocniri și din față și din spate, și din dreapta și din stînga, și puternice și slabe. Fiind supusă la astfel de lovituri dezordonate, în timpul acestor întîlniri întîmplătoare, molecula pe care o urmărim va alerga în toate părțile prin vasul în care este închis gazul.

Ce distanță poate parcurge o moleculă de gaz fără să se ciocnească?

Ea depinde de dimensiunile moleculelor și de densitatea gazului. Cu cît dimensiunile moleculelor sînt mai mari și cu cît numărul lor în vas este mai mare, cu atît mai des se vor ciocni. Lungimea medie a drumului parcurs de o moleculă fără a se ciocni — se numește drumul liber mijlociu — este egală, în condiții obișnuite, cu $11 \cdot 10^{-6}$ cm $= 1\,100$ Å pentru moleculele de hidrogen și cu $5 \cdot 10^{-6}$ cm $= 500$ Å pentru moleculele de oxigen. $5 \cdot 10^{-6}$ cm înseamnă a douăzecea mia parte dintr-un milimetru, ceea ce reprezintă o distanță foarte mică, dar în comparație cu dimensiunile moleculelor nu este de loc mică. Distanței de $5 \cdot 10^{-6}$ cm parcursă de o moleculă de oxigen îi corespunde, la scara respectivă, o distanță de 10 m parcursă de o bilă de biliard.

Structura unui lichid diferă substanțial de structura unui gaz ale cărui molecule se găsesc departe una de alta și se ciocnesc doar rareori. Într-un lichid, moleculele se găsesc permanent în imediată apropiere. Moleculele de lichid sînt ca niște cartofi într-un sac, ce-i drept, cu diferența că moleculele lichidului se găsesc în stare de neîncetată mișcare termică haotică. Din cauză că sînt foarte înghesuite, ele nu se pot deplasa atît de liber ca moleculele gazului. Fiecare „bate pasul" tot timpul aproape pe loc, înconjurată de aceleași vecine și se deplasează doar puțin prin volumul ocupat de lichid. Cu cît lichidul este mai vîscos, cu atît această deplasare este mai înceată. Dar chiar într-un lichid atît de „mobil" cum este apa, o moleculă se deplasează cu 3 Å în timpul care i-ar trebui unei molecule de gaz ca să parcurgă 700 Å.

Forțele de interacțiune dintre molecule joacă un rol hotărîtor în mișcarea termică a acestora în corpurile solide. Într-o substanță solidă, moleculele se găsesc aproape tot timpul în aceeași poziție. Mișcarea termică se manifestă numai prin faptul că moleculele oscilează neîncetat în jurul poziției de echilibru. Lipsa deplasărilor sistematice este cauza a ceea ce numim duritate. În adevăr, dacă moleculele nu-și schimbă vecinele, cu atît mai mult diferitele părți ale corpului rămîn în legătură invariabilă una cu alta.

Moleculele unui gaz lovesc în pereții vasului cum bat picăturile de ploaie pe acoperiș. Numărul acestor lovituri este enorm și efectul lor, contopindu-se, produce acea presiune care pune în mișcare pistonul unui motor, face să explodeze un obuz sau umflă un balon sferic. Grindina de lovituri moleculare constituie presiunea atmosferică, presiunea care face să sară capacul unui ceainic care fierbe, forța care azvîrle glonțul din pușcă.

De ce depinde presiunea unui gaz? Presiunea este cu atît mai mare cu cît lovitura aplicată de o moleculă este mai puternică. Nu mai puțin evident este faptul că presiunea depinde și de numărul de lovituri aplicate într-o secundă. Cu cît sînt mai multe molecule într-un vas cu atît loviturile sînt mai dese și cu atît presiunea este mai mare. Așadar, în primul rînd, presiunea p a unui gaz dat este proporțională cu densitatea sa.

Dacă masa gazului este constantă, micșorînd volumul lui îi mărim densitatea de un număr corespunzător de ori. Așadar, presiunea gazului într-un astfel de vas închis este invers proporțională cu volumul său, cu alte cuvinte, produsul dintre presiune și volum trebuie să fie constant:

$$pV = \text{const.}$$

Această lege simplă a fost descoperită de fizicianul englez Boyle și de omul de știință francez Mariotte. Legea lui Boyle-Mariotte este una dintre primele legi cantitative din istoria fizicii. Bineînțeles că ea este valabilă la temperatură constantă.

Pe măsură ce un gaz este comprimat, legea lui Boyle-Mariotte se verifică din ce în ce mai prost. Moleculele se apropie între ele, iar interacțiunea lor începe să se repercuteze asupra comportării gazului.

Legea lui Boyle-Mariotte este valabilă cînd intervenția forțelor de interacțiune în viața moleculelor este absolut imperceptibilă. De aceea se spune că legea lui Boyle-Mariotte este legea gazelor perfecte.

Adjectivul „perfect" aplicat cuvîntului „gaz" sună cam comic. Perfect înseamnă ceva cum nu se poate mai bun.

Cu cît o moleculă sau o schemă este mai simplă, cu atît ea este mai perfectă pentru fizician, căci calculele se simplifică, iar explicațiile fenomenelor fizice devin ușoare și clare. Termenul de „gaz perfect" se referă la schema cea mai simplă a unui gaz. Comportarea gazelor suficient de rarefiate este practic identică cu comportarea gazelor perfecte.

Compresibilitatea lichidelor este mult mai mică decît compresibilitatea gazelor. În lichide, moleculele se găsesc în „atingere" unele cu altele. Compresiunea constă numai în îmbunătățirea „împachetării" moleculelor, iar în cazul presiunilor foarte mari, și într-o presare a moleculei însăși. În ce măsură forțele de respingere îngreuiază comprimarea unui lichid se poate vedea din următoarele valori: mărimea presiunii de la una la două atmosfere atrage după sine micșorarea volumului unui gaz la jumătate, pe cînd volumul apei se reduce cu 1/250 000.

Chiar presiunea enormă din adîncurile oceanului este incapabilă să comprime apa într-o măsură sensibilă. În adevăr, presiunea de o atmosferă este produsă de o coloană de apă de 10 m. Presiunea sub un strat de apă de 10 km este egală cu 1 000 atm. Volumul apei se micșorează, deci cu 1 000/20 000, adică cu 1/20.

Compresibilitatea corpurilor solide diferă prea puțin de compresibilitatea unui lichid, căci în ambele cazuri moleculele sînt deja în contact între ele, iar comprimarea se poate realiza numai printr-o și mai mare apropiere a moleculelor care deja se resping puternic. Prin presiuni supraînalte de 50 la 1 000 de mii de atmosfere se reușește să se comprime oțelul cu 1/1 000, iar plumbul cu 1/7 din volumul lui.

Din aceste exemple se vede că, în condițiile de pe Pămînt, nu se poate comprima substanța solidă într-o măsură mai însemnată.

În univers, însă există corpuri în care materia este comprimată incomparabil mai puternic. Astronomii au descoperit existența unor stele în care densitatea ajunge pînă la 10^6 g/cm^3. În interiorul acestor stele — ele se numesc pitice albe („albe" din cauza luminii lor, și „pitice" din cauza dimensiunilor lor relativ mici) — trebuie să existe o presiune enormă.

Variația presiunii cu înălțimea

Cînd înălțimea crește, presiunea scade. Acest lucru a fost lămurit pentru prima oară de francezul Perrier din însărcinarea lui Pascal în anul 1648. Muntele Puy de Dôme, în apropierea căruia locuia Perrier, avea înălțimea de 975 m. Măsurările au arătat că mercurul din tubul lui Torricelli se cobora cu 8 mm cînd tubul era urcat pe vîrful muntelui.

Scăderea presiunii aerului cu creșterea înălțimii este absolut naturală, căci sus pe munte apasă asupra instrumentului o coloană de aer mai mică.

Dacă ați zburat cu avionul, știți că pe peretele din față al cabinei este instalat un instrument care indică cu o precizie de cîteva zeci de metri înălțimea la care s-a ridicat avionul. Acest instrument se numește altimetru. El este un barometru obișnuit, dar etalonat în valori ale înălțimilor deasupra nivelului mării.

Presiunea scade cu creșterea înălțimii; să găsim formula pentru această legătură. Să detașăm un mic strat de aer cu aria de 1 cm^2 situat între înălțimile h_1 și h_2. Într-un strat nu prea gros de aer, variația densității cu înălțimea este foarte mică. De aceea, greutatea volumului de aer detașat (el este un cilindru cu înălțimea $h_2 - h_1$ și cu baza de 1 cm^2) va fi $mg = \rho(h_2 - h_1)g$. Această greutate reprezintă variația de presiune în cazul ridicării de la înălțimea h_1 la înălțimea h_2, adică

$$\frac{p_1 - p_2}{p} = g(h_2 - h_1).$$

Dar, conform legii lui Boyle-Mariotte, densitatea unui gaz este proporțională cu presiunea. De aceea

$$\frac{p_1 - p_2}{p} \sim (h_2 - h_1).$$

În membrul întîi se găsește fracțiunea cu care a crescut presiunea cînd înălțimea a scăzut de la h_2 la h_1. Așadar, la variații identice $h_2 - h_1$ ale înălțimii va corespunde o creștere a presiunii cu același procent.

Măsurările și calculele concordă perfect în a arăta că, în timpul ridicării deasupra nivelului mării, presiunea va scădea cu 0,1 la fiecare kilometru. Același lucru se poate spune și despre coborîrea în puțuri adînci sub nivelul mării: la o coborîre cu 1 km presiunea va crește cu 0,1 din valoarea sa.

Este vorba de variația cu 0,1 din valoarea presiunii la înălțimea precedentă. Aceasta înseamnă că la o ridicare cu 1 km, presiunea se va micșora pînă la 0,9 din presiunea la nivelul mării, la ridicarea cu încă 1 km, ea va deveni egală cu 0,9 din 0,9 din presiunea la nivelul mării; la înălțimea de 3 kilometri, presiunea va fi egală cu 0,9 din 0,9 din 0,9, adică cu $(0,9)^3$ din presiunea la nivelul mării. Acest raționament poate fi continuat cu ușurință și mai departe.

Notînd presiunea la nivelul mării cu p_0, se poate scrie presiunea la înălțimea h (exprimată în kilometri) astfel:

$$p = p_0\,(0,87)^h = p_0 \cdot 10^{-0,06\ h}.$$

În paranteză figurează un număr mai precis, căci 0,9 este o valoare rotunjită. Această formulă presupune că temperatura este identică la toate înălțimile. De fapt, temperatura atmosferei variază cu înălțimea, și anume după o lege destul de complicată. Cu toate acestea, formula dă rezultate destul de bune și poate fi folosită chiar la înălțimi de sute de kilometri.

Cu ajutorul acestei formule se poate stabili cu ușurință că la înălțimea muntelui Elbrus — de circa 5,6 km — presiunea scade aproximativ la jumătate, iar la înălțimea de 22 km (recordul de înălțime al unui stratostat cu oameni) presiunea scade la 50mm Hg.

Cînd spunem că presiunea de 760 mm Hg este normală, nu trebuie să uităm să adăugăm: „la nivelul mării". La înălțimea de 5,6 km, presiunea normală va fi nu de 760, ci de 380 mm Hg.

Împreună cu presiunea, după aceeași lege scade și densitatea aerului odată cu creșterea înălțimii. La înălțimea de 160 km, nu mai rămîne decît foarte puțin aer. În adevăr,

$$(0{,}87)^{160} = 10^{-10}$$

La suprafața solului, densitatea aerului este egală aproximativ cu 1 000 g/m^3; deci, conform formulei de mai înainte, la înălțimea de 160 km, într-un metru cub trebuie să se găsească 10^{-7} g de aer. De fapt, după cum arată măsurările făcute cu ajutorul rachetelor, densitatea aerului la această înălțime este de zece ori mai mare.

Formula noastră dă un rezultat și mai mic în comparație cu realitatea cînd este vorba de înălțimi de cîteva sute de kilometri. Faptul că formula devine nevalabilă la înălțimi mari se datorește variației temperaturii cu înălțimea, precum și fenomenului special al descompunerii moleculelor de aer sub influența radiației solare. Nu vom insista aci asupra acestei chestiuni.

Vidul

Un vas gol în sens tehnic mai conține încă nu număr enorm de molecule.

La multe aparate de fizică, moleculele de gaz sînt un inconvenient serios. Lămpile de radio, tuburile Roentgen, acceleratoarele de particule elementare — toate aceste aparate au nevoie de vid[1], adică de spațiu în care să nu existe molecule de gaz. Și

[1] Vidul se mai numește și *vacuum* (cuvînt latinesc care înseamnă „gol")

într-un bec electric obișnuit trebuie să fie vid. Dacă pătrunde aer într-un bec, filamentul său se oxidează și se arde imediat.

În cele mai bune aparate cu vid există un vid de ordinul a 10^{-8} mm Hg. S-ar părea că această presiune este absolut infimă, căci nivelul mercurului dintr-un manometru s-ar deplasa doar cu a suta milioana parte dintr-un milimetru cînd presiunea variază cu această cantitate.

Și totuși, la această presiune de nimic, în 1 cm^3 se găsesc încă cîteva sute de milioane de molecule.

E interesant de comparat acest vid cu acela existent în spațiul interstelar; acolo la cîțiva centimetri cubi revine în medie o singură particulă elementară de substanță.

Pentru obținerea vidului se folosesc pompe speciale. O pompă obișnuită, care extrage gazul prin mișcarea unui piston, poate crea un vid de cel mult 0,01 mm Hg. Un vid bun sau, cum se spune, înaintat se poate obține cu ajutorul așa-numitelor pompe de difuziune — cu mercur sau cu ulei — în care moleculele de gaz sînt antrenate de un jet de vapori de mercur sau de ulei.

Pompele cu mercur, care poartă numele lui Langmuir, inventatorul lor, încep să funcționeze numai după ce s-a scos gazul pînă la o presiune de 0,1 mm Hg; această rarefiere prealabilă se numește vid preliminar.

Principiul de funcționare este următorul: un mic recipient de sticlă comunică cu un vas cu mercur, cu spațiul din care urmează să se scoată gazul și cu pompa de vid preliminar. Se încălzește mercurul, iar pompa de vid preliminar antrenează vaporii săi. În drumul lor, vaporii de mercur captează moleculele de gaz și le introduc în pompa de vid preliminar. Atomii de mercur se condensează sub formă de lichid (se prevede răcirea lor cu apă curgătoare), care se scurge în vasul de unde mercurul și-a început călătoria.

Vidul care se poate realiza în condiții de laborator, după cum am mai spus, încă nu este golul în înțelesul absolut al cuvîntului. Acest vid este doar un gaz foarte rarefiat. Proprietățile acestui gaz, însă pot diferi substanțial de proprietățile gazului obișnuit.

Mișcarea moleculelor care „formează vidul“ își modifică caracterul cînd drumul liber al unei molecule devine mai mare decît dimensiunile vasului în care se găsește gazul. Atunci moleculele se ciocnesc rareori între ele și călătoria lor are loc după niște linii drepte în zigzag, moleculele lovindu-se cînd de un perete al vasului, cînd de celălalt.

Să calculăm la ce presiune se va întîmpla acest lucru. S-a spus mai înainte că, la presiunea atmosferică, drumul liber al unei

molecule este egal cu $5 \cdot 10^{-6}$ cm. Dacă se mărește această lungime de 10^7 ori, el va deveni de 50 cm, adică va fi sensibil mai mare decît un vas de dimensiuni mijlocii. Întrucît lungimea parcursului este invers proporțională cu densitatea și, prin urmare, și cu presiunea, presiunea în acest caz trebuie să fie de 10^{-7} din presiunea atmosferică sau de aproximativ 10^{-4} mm Hg.

Nici spațiul interplanetar nu este absolut gol, dar densitatea materiei în el este de circa $5 \cdot 10^{-24}$ g/cm^3. Partea principală din substanța interplanetară constă din hidrogen atomic. În prezent se consideră că în Cosmos revin cîțiva atomi de hidrogen la 1 cm^3. Dacă s-ar mări molecula de hidrogen la dimensiunile unui bob de mazăre și s-ar plasa o astfel de „moleculă" la Moscova, cel mai apropiat „vecin cosmic" al ei s-ar găsi la Tula[1].

Cristalele

Mulți cred că cristalele sînt niște pietre frumoase, rar întîlnite. Ele sînt de diferite culori, de obicei transparente și, ceea ce e mai remarcabil, au o formă regulată, frumoasă. De cele mai multe ori cristalele reprezintă niște poliedre, ale căror fețe sînt perfect plane, iar muchiile riguros drepte. Ele încîntă ochiul prin jocul admirabil al luminii pe fețele lor și prin structura lor minunată.

Printre ele se găsesc și cristalele de sare gemă (clorură de sodiu naturală, adică sare de bucătărie obișnuită). Ele se întîlnesc în natură sub formă de paralelipipede dreptunghice sau de cuburi. Și cristalele de calcit au formă simplă de paralelipipede oblice transparente. Mult mai complicate sînt cristalele de cuarț. Fiecare mic cristal are o mulțime de fețe de diferite forme, care se intersectează după muchii de diferite lungimi.

Cristalele nu sînt însă nicidecum obiecte rare de muzeu. Cristalele ne înconjură pretutindeni. Corpurile solide din care clădim case și construim mașini-unelte, substanțele pe care le folosim în viața de toate zilele fac aproape toate parte din categoria cristalelor. Dar de ce nu vedem acest lucru? În adevăr, în natură rareori se întîlnesc corpuri sub formă de cristale individuale (sau, cum se spune, monocristale). De cele mai multe ori, substanțele se găsesc sub formă de mici granule cristaline strîns unite între ele, de dimensiuni extrem de mici—mai mici decît a mia parte dintr-un milimetru. Această structură se poate vedea numai la microscop.

[1] Distanța Moscova-Tula în linie dreaptă este de circa 160 km. — *N.T.*

Corpurile care constau din mici granule cristaline se numesc fin cristaline sau policristaline.

Desigur, printre cristale trebuie să se numere și corpurile policristaline. În acest caz, aproape toate corpurile solide care ne înconjură sînt cristale. Nisipul și granitul, cuprul și fierul, salolul care se vinde la farmacie și coloranții sînt toate cristale.

Există și excepții: sticla și masele plastice nu constau din cristale. Astfel de corpuri solide se numesc amorfe.

Așadar, a studia cristalele înseamnă a studia aproape toate corpurile care ne înconjură. Se înțelege deci cît de important este acest lucru.

Cristalele individuale se recunosc imediat după forma lor regulată. Fețele plane și muchiile drepte sînt proprietăți caracteristice ale oricărui cristal. Forma regulată se datorește, fără îndoială, structurii interne regulate a cristalului. Dacă un cristal a crescut în mod deosebit într-o direcție oarecare, înseamnă că și structura cristalului este oarecum diferită în acea direcție.

Închipuiți-vă însă că dintr-un cristal mare s-a făcut la strung o sferă. Vă veți putea da seama că aveți în mînă un cristal și veți putea deosebi această sferă de o bilă de sticlă? Forma naturală a unui cristal arată că acesta este diferit în diferitele direcții. Dacă această diferență se manifestă în ce privește forma, ea trebuie să existe și în privința celorlalte însușiri. Rezistența mecanică a cristalului, proprietățile sale electrice, conductibilitatea termică — toate proprietățile pot diferi în diferitele direcții. Această particularitate a cristalelor se numește anizotropia proprietăților lor. Anizotrop înseamnă diferit în diferite direcții.

Cristalele sînt anizotrope. Dimpotrivă, corpurile amorfe, lichidele și gazele sînt izotrope, adică au proprietăți identice (*izo* pe grecește înseamnă „identic") în diferite direcții (*tropos* înseamnă direcție).

Anizotropia proprietăților permite să se recunoască dacă o bucată transparentă de substanță fără formă regulată este sau nu un cristal.

Structura cristalelor

De ce este atît de frumoasă și de regulată forma cristalelor? Fețele lor, strălucitoare și netede, par ca și cum ar fi fost prelucrate de un șlefuitor iscusit. Diferitele părți ale unui cristal se reproduc una pe alta, formînd o figură simetrică frumoasă.

Răspunsul la întrebarea de mai înainte nu poate fi decît unul singur — frumuseții exterioare trebuie să-i corespundă o regularitate interioară. Această regularitate constă în repetarea de un mare număr de ori a acelorași părți principale.

Închipuiți-vă grilajul unui parc făcut din vergele de diferite lungimi și așezate cum s-a nimerit. Urîtă priveliște! Un grilaj frumos este construit din vergele identice, așezate regulat la distanțe egale una de alta.

Tot o imagine care se repetă mereu găsim și la tapete. Aici un element de desen — să zicem, o fetiță care se joacă cu mingea — se repetă nu într-o direcție, ca la grilajul parcului, ci umple un plan.

Ce legătură are grilajul parcului și tapetul cu un cristal? Ele au o legătură cît se poate de directă. Grilajul parcului este format din elemente care se repetă de-a lungul unei linii, tapetul constă din desene care se repetă de-a lungul și de-a latul unui plan, iar cristalul este format din grupuri de atomi care se repetă în spațiu. De aceea se și spune că atomii unui cristal formează o rețea în spațiu (sau cristalină, sau rețea spațială).

În prezent se cunoaște structura a cîtorva sute de cristale. Vom vorbi despre structura celor mai simple cristale și, în primul rînd, de a acelora care sînt construite din atomi de același fel.

Trei tipuri de rețele sînt mai răspîndite. Ele sînt reprezentate în fig. 89. Punctele reprezintă centrele atomilor; liniile care unesc

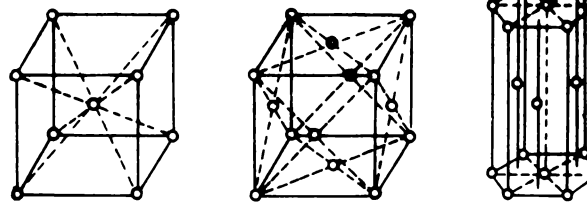


FIG. 89

centrele nu au o existență reală. Ele sînt duse numai pentru a face mai clară pentru cititor poziția în spațiu a atomilor.

În fig. 89, a și b, sînt reprezentate rețele cubice. Pentru a vă face o idee mai clară despre aceste rețele, închipuiți-vă că ați format în modul cel mai simplu — punînd muchie lîngă muchie, față lîngă față — niște cuburi cu care se joacă copiii.

Dacă acum plasați cu gîndul puncte în vîrfurile și în centrul volumului cubului, rezultă rețeaua cubică reprezentată în figura din stînga. Această structură se numește rețea cubică cu volum centrat. Dacă se plasează punctele în vîrfurile cubului și în centrele fețelor lor, se formează rețeaua cubică reprezentată în figura din mijloc. Ea se numește rețea cubică cu fețe centrate.

A treia rețea (fig. 89, c) se numește rețea hexagonală cu densitate maximă. Pentru a înțelege originea acestui termen și a ne imagina mai clar poziția atomilor în această rețea, să luăm niște bile de biliard și să le așezăm cît mai dese cu putință. În primul rînd vom forma un strat compact; el va avea înfățișarea unor bile de biliard adunate „în triunghi" înainte de a începe jocul (fig. 90).

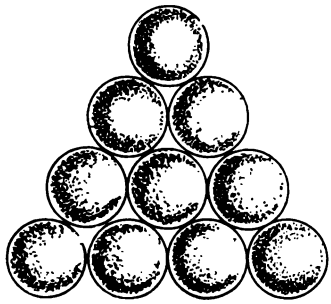


FIG. 90

Observăm că bila din interiorul triunghiului are șase vecine cu care vine în contact și că aceste șase vecine formează un hexagon. Continuăm să clădim bilele așezînd straturile unul peste altul. Dacă punem bilele stratului următor direct deasupra bilelor din primul strat, acest mod de așezare nu este cel mai îndesat. Dacă vrem să facem să încapă într-un anumit volum un număr maxim de bile, trebuie să așezăm bilele stratului al doilea în scobiturile primului, bilele stratului al treilea în scobiturile celui de al doilea și așa mai departe. În sistemul de așezare hexagonal cu densitate maximă, bilele din stratul al treilea sînt situate astfel încît centrele acestor bile se găsesc deasupra centrelor stratului întîi.

Centrele atomilor sînt situate în rețeaua hexagonală cu densitate maximă ca centrele bilelor așezate înghesuit în modul descris.

În cele trei tipuri de rețele de care am vorbit cristalizează o mulțime de elemente:

Sistemul hexagonal cu densitate maximă	Be, Co, Hf, Ti, Zn, Zr
Sistemul cubic cu fețe centrate	Al, Cu, Co, Fe, Au, Ge, Ni, Ti
Sistemul cubic cu volum centrat	Cr, Fe, Li, Mo, Ta, Ti, U, V

Dintre celelalte structuri menționăm numai cîteva. În fig. 91 este reprezentată structura diamantului. Pentru această structură este caracteristic faptul că atomul de carbon al diamantului are

patru vecini mai apropiați. Să comparăm acest număr cu numerele corespunzătoare ale celor trei structuri mai răspîndite descrise mai înainte. După cum se vede din figuri, în sistemul hexagonal cu densitate maximă, fiecare atom are 12 vecini mai apropiați și tot atîția vecini au atomii care formează rețeaua cubică cu fețe

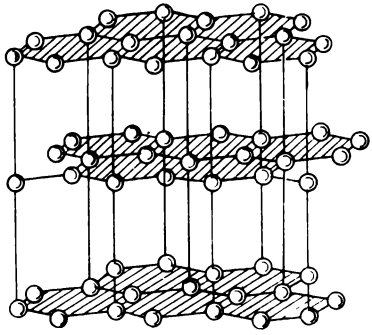


FIG. 91

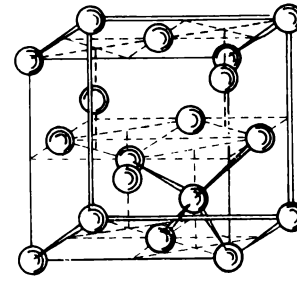


FIG. 92

centrate pe cînd în rețeaua cu volum centrat, fiecare atom are 8 vecini.

Vom spune cîteva cuvinte despre grafit, a cărui structură este arătată în fig. 92. Particularitatea acestei structuri atrage atenția. Grafitul constă din straturi de atomi, atomii dintr-un strat fiind legați între ei mai puternic decît cu atomii din straturile vecine. Aceasta se datorește mărimii distanțelor interatomice: distanța dintre vecinii din același strat este de 2,5 ori mai mică decît distanța dintre straturi.

Faptul că straturile de atomi sînt slab legate între ele are ca efect că cristalele de grafit se despică de-a lungul acestor straturi. De aceea, grafitul dur poate servi ca material de ungere în cazurile în care nu este posibil să se folosească uleiuri de uns, — de exemplu, la temperaturi prea joase sau prea înalte. Grafitul este un material de ungere solid.

Frecarea dintre două corpuri se reduce, în mare, la faptul că proeminențele unui corp pătrund în depresiunile celuilalt. Efortul suficient pentru a despica un cristal microscopic de grafit este mult mai mic decît forțele de frecare și de aceea ungerea cu grafit ușurează considerabil alunecarea unui corp pe altul.

Structurile cristalelor compușilor chimici sînt infinit de variate. Ca exemple extreme — în sensul deosebirilor — pot servi structurile sării gemă și bioxidului de carbon, reprezentate în fig. 93 și 94.

Cristalele de sare gemă (fig. 93) constau din atomi de sodiu (sferele mici de culoare închisă), care alternează de-a lungul axelor cubului cu atomii de clor (sferele mari de culoare deschisă).

Fiecare atom de sodiu are șase vecini de celălalt fel, situați la distanțe egale. Același lucru se observă și la clor. Dar unde este

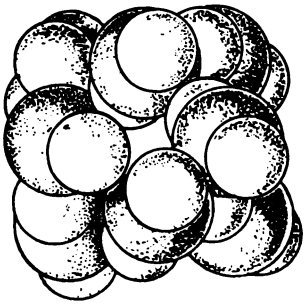


FIG. 93

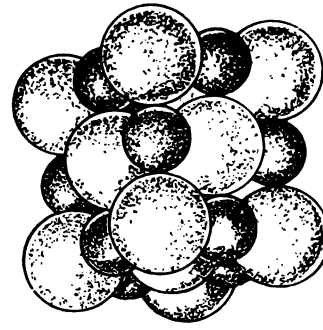


FIG. 94

molecula de clorură de sodiu? Ea nu există. În cristal nu se găsește o grupă formată dintr-un atom de sodiu și un atom de clor, ci în general nici un fel de grupă de atomi nu se distinge dintre ceilalți atomi, cu toată apropierea lor.

Formula chimică NaCl nu ne dă temei să spunem că „substanța este formată din molecule de NaCl". Formula chimică indică numai că substanța este formată dintr-un număr egal de atomi de sodiu și de clor.

Problema existenței moleculelor unei substanțe se rezolvă cu ajutorul structurii. Dacă în structură nu se evidențiază un grup de atomi apropiați, nu există molecule. Cristalele fără molecule se numesc atomice.

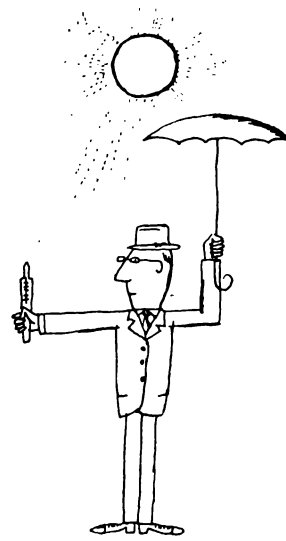
Cristalul de bioxid de carbon CO_2 (gheața uscată, care se găsește în lăzile vînzătorilor de înghețată) este un exemplu de cristal molecular (fig. 94).

Centrele atomilor de oxigen și de carbon ai moleculei de CO_2 sînt situate de-a lungul unei linii drepte. Distanța C—O este egală cu 1,3 Å, pe cînd distanța dintre atomii de oxigen ai moleculelor vecine este de circa 3 Å. În aceste condiții „recunoaștem" imediat molecula în cristal.

Cristalele moleculare sînt formate din molecule foarte îndesate. Pentru a le vedea, este necesar să se deseneze contururile moleculei. Așa s-a și procedat în fig. 94.

XI

Temperatura



Termometrul

Dacă punem în contact două corpuri încălzite diferit, cel mai cald se va răci, iar cel mai rece va deveni mai cald. Despre aceste două corpuri se spune că schimbă căldură între ele; desigur că în viața de toate zilele nu numim schimb cazul în care un om dă altuia o sută de lei, iar celălalt îi ia, dar în fizică s-a adoptat această terminologie.

Schimbul de căldură este o formă de transmitere a energiei. Numim mai cald un corp care cedează energie. Simțim că un corp este cald dacă el încălzește mîna, adică îi transmite energie. Dimpotrivă, dacă corpul se simte rece, înseamnă că absoarbe energie de la corpul nostru.

Despre un corp care cedează căldură (adică cedează energie prin schimb de căldură), spunem că temperatura lui este mai mică decît temperatura corpului care absoarbe această căldură.

Observînd dacă obiectul care ne interesează se răcește sau se încălzește în prezența unui corp oarecare, găsim „locul" acelui obiect în seria de corpuri încălzite. Temperatura este un fel de reper care indică pentru care corpuri obiectul care ne interesează este donator și pentru care este receptor de căldură.

Temperatura se măsoară cu termometrul.

La baza construcției termometrelor se poate pune utilizarea diferitelor proprietăți ale corpurilor sensibile la temperatură. De

cele mai multe ori se folosește proprietatea corpurilor de a se dilata cînd temperatura se ridică.

Dacă prin contactul cu diferite obiecte corpul termometric își modifică volumul, înseamnă că obiectele au temperaturi diferite. Cînd volumul corpului termometric devine mai mare, temperatura este mai ridicată, iar cînd volumul este mai mic, temperatura este mai scăzută.

Pot servi drept corpuri termometrice atît lichidele ca mercurul sau alcoolul, cît și solidele — metale — și gazele. Dar diferitele corpuri se dilată în mod diferit și, deci, gradele ridicate de mercur, alcool, gaze etc. coincid. Firește, pe toate termometrele se pot întotdeauna marca două puncte principale: temperatura de topire a gheței și cea de fierbere a apei. De aceea, toate termometrele indică la fel întotdeauna 0 și 100 de grade Celsius. Dar între 0 și 100°C, corpurile nu se dilată la fel. Un corp se dilată repede între 0 și 50°C ale termometrului cu mercur și încet în a doua parte a acestui interval, iar altul dimpotrivă.

Cînd confecționăm termometre folosind diferite corpuri care se dilată, constatăm diferențe sensibile între indicațiile lor, cu toate că în punctele principale indicațiile coincid. Ceva mai mult, un termometru cu apă ne-ar conduce la următoarea descoperire: dacă s-ar pune pe un reșou electric un corp răcit la zero grade, „temperatura" sa, măsurată cu ajutorul apei, mai întîi ar scădea și apoi ar crește. Cauza este că apa, cînd se încălzește, mai întîi își micșorează volumul și numai după aceea se comportă „normal", adică își mărește volumul prin încălzire.

Vedem că alegerea nechibzuită a substanței pentru termometru ne poate pune în încurcătură.

După ce criteriu trebuie însă să ne conducem în alegerea termometrului „corect"? Ce corp este ideal în acest scop?

Am vorbit deja despre astfel de corpuri ideale: gazele perfecte. La un gaz perfect nu există interacțiune între molecule și, studiind dilatarea unui gaz perfect, studiem de fapt cum variază mișcarea moleculelor sale. Tocmai din această cauză un gaz perfect este corpul ideal pentru termometru.

În adevăr, sare imediat în ochi faptul că dacă apa se dilată altfel decît alcoolul, alcoolul altfel decît sticla, sticla altfel decît fierul, în schimb hidrogenul, oxigenul, azotul sau orice alt gaz în stare suficient de rarefiată pentru a merita denumirea de gaz perfect se dilată exact la fel cînd sînt încălzite.

Așadar, baza determinării temperaturii în fizică este variația volumului unei cantități determinate de gaz perfect. Bineînțeles avînd în vedere compresibilitatea mare a gazelor, trebuie să se

aibă o grijă deosebită ca gazul să se găsească sub presiune constantă. Pentru a etalona termometrul cu gaz, trebuie să măsurăm precis volumul la 0° și la 100° al gazului folosit. Diferența dintre volumele V_{100} și V_0 o împărțim în 100 de părți egale. Cu alte cuvinte, variația volumului gazului cu $\frac{1}{100}\left(V_{100} - V_0\right)$ corespunde tocmai unui grad Celsius (1°C).

Acum să presupunem că termometrul nostru indică volumul V. Ce temperatură t[°C] corespunde acestui volum? Este ușor de văzut că

$$t[°C] = \frac{V - V_0}{V_{100} - V_0} \cdot 100,$$

adică

$$\frac{t[°C]}{100} = \frac{V - V_0}{V_{100} - V_0}.$$

Cu ajutorul acestei egalități, raportăm fiecare volum V la temperatura t și obținem scara de temperaturi[1] de care se servesc fizicienii.

Cînd temperatura se mărește, volumul gazului crește nelimitat și deci nu există nici o limită a creșterii temperaturii. Dimpotrivă, temperaturile joase (negative pe scara Celsius) au o limită.

În adevăr, ce se întîmplă cînd temperatura scade? Un gaz real, în cele din urmă se transformă în lichid, iar dacă temperatura scade mai departe, se solidifică. Moleculele gazului se adună într-un volum foarte mic. Cu ce va fi însă egal acest volum la termometrul nostru umplut cu un gaz perfect? Moleculele sale nu interacționează și nu au volum propriu. Așadar, scăderea temperaturii va aduce gazul perfect la un volum egal cu zero. Este absolut posibil

---

[1] Scara Celsius, la care se ia ca 0°C temperatura gheței care se topește și ca 100°C temperatura de fierbere a apei (ambele la presiunea normală de 760 mm Hg) este foarte comodă. Cu toate acestea, englezii și americanii se serveau pînă nu de mult de o scară de temperaturi care pare foarte ciudată. De exemplu, cum veți găsi această frază dintr-un roman englezesc: „Vara nu era prea călduroasă, temperatura era de 60—70 grade". Să fie o greșeală de tipar? Nu, este vorba de scara Fahrenheit (°F).

În Anglia temperatura scade rareori sub —20°C. Fahrenheit a ales un amestec de gheață și sare avînd aproximativ această temperatură și a luat-o ca zero. După însuși cuvintele autorului, pe această scară s-a luat ca 100° temperatura normală a corpului omului. Dar pentru stabilirea acestui punct, Fahrenheit s-a servit, probabil, de un om care avea puțină febră. Temperatura normală medie a corpului omului pe scara Fahrenheit corespunde la 98°F. Pe această scară apa îngheață la +32°F și fierbe la 212°F. Formula de transformare este

$$t[°C] = \frac{5}{9}(t - 32)°F.$$

să ne apropiem practic oricît de mult de comportarea caracteristică pentru un gaz perfect, în cazul de față de valoarea nulă a volumului. În acest scop trebuie să se umple termometrul cu un gaz din ce în ce mai rarefiat. De aceea nu vom greși considerînd un volum extrem de mic de gaz ca egal cu zero.

Conform formulei menționate, volumului egal cu zero îi corespunde cea mai joasă temperatură posibilă. Această temperatură se numește zero absolut.

Pentru a determina poziția punctului zero absolut pe scara Celsius, trebuie să se înlocuiască în formula de mai înainte cu valoarea zero a volumului, $V = 0$. Așadar, temperatura zero absolut este egală cu $-\frac{V_0 \cdot 100}{V_{100} - V_0}$.

Acest punct remarcabil corespunde unei temperaturi de aproximativ $-273°C$ (mai exact, $-273{,}16$).

Așadar, nu există temperaturi mai joase decît zero absolut, căci ele corespund unui volum negativ al gazului. Este absurd să se vorbească de temperaturi mai joase. Este tot așa de imposibil să se obțină temperaturi sub zero absolut ca a fabrica sîrmă cu diametrul mai mic decît zero.

La zero absolut un corp nu se mai poate răci, adică nu i se mai poate sustrage energie. Cu alte cuvinte, la zero absolut, corpurile și particulele din care sînt făcute au energia minimă posibilă. Aceasta înseamnă că la zero absolut energia cinetică este egală cu zero, iar energia potențială are valoarea minimă posibilă.

Întrucît zero absolut este cea mai joasă temperatură, este natural ca în fizică, și în special în capitolele ei în care figurează temperaturi joase, să se facă uz de scara absolută de temperaturi, pe care citirea se face de la zero absolut. E clar că $t_{abs} = (t + 273)°C$. Temperatura camerei se găsește pe scara absolută la circa 300°. Scara absolută de temperaturi se numește și scara Kelvin, după numele celebrului om de știință din secolul al XIX-lea și în loc de notația t_{abs} se folosește notația $T[°K]$.

Formula termometrului cu gaz, cu care se determină temperatura T, poate fi scrisă pentru temperatura absolută sub forma

$$T = 100 \cdot \frac{V - V_0}{V_{100} - V_0} + 273.$$

Pe baza egalității $\frac{100\, V_0}{V_{100} - V_0} = 273$, se ajunge la următorul rezultat simplu:

$$\frac{T}{273} = \frac{V}{V_0}.$$

Așadar, temperatura absolută este pur și simplu proporțională cu volumul gazului perfect.

Pentru măsurări precise de temperatură, fizicienii trebuie să recurgă la tot felul de artificii. Într-un interval destul de lung de temperaturi, termometrele cu mercur, cu alcool (pentru Arctica) și altele se etalonează după un termometru cu gaz. Dar nici acesta nu este bun pentru temperaturi foarte apropiate de zero absolut (sub 0,7°K), cînd toate gazele se lichefiază, precum și la temperaturi de peste 600°C, cînd gazele pătrund prin sticlă. Pentru temperaturi înalte și foarte joase se face uz de alte principii de măsurare a temperaturii.

Cît privește mijloacele practice de măsurare a temperaturii, ele sînt foarte numeroase. O mare importanță o au instrumentele bazate pe fenomene electrice. Acum este important să reținem un singur lucru: în orice măsurări de temperaturi trebuie să fim convinși că mărimea de măsurat coincide pe deplin cu ceea ce ar da măsurarea dilatării unui gaz rarefiat.

Temperaturi înalte se produc în cuptoare și arzătoare. În cuptoarele de cofetărie, temperatura atinge 220—280°C. Temperaturi mai înalte se folosesc în metalurgie: 900—1 000°C în cuptoarele de călire, 1 400—1 500°C în cuptoarele de forjare. În cuptoarele de topit oțel, temperatura atinge 2 000°C.

Temperaturi înalte record se obțin în cuptoare cu ajutorul arcului electric (circa 5 000°C). Flacăra arcului permite să se „vină de hac" metalelor celor mai greu fuzibile.

Care este însă temperatura flăcării unui arzător de gaze? Temperatura conului interior albastru al flăcării este doar de 300°. În conul exterior, temperatura ajunge la 1 800°.

Temperaturi incomparabil mai înalte iau naștere în timpul exploziei unei bombe atomice. După evaluări indirecte, temperatura în centrul exploziei atinge mai multe milioane de grade.

În ultimul timp s-au făcut încercări de a se obține astfel de temperaturi supraînalte în instalații speciale de laborator (OGRA, ZETA). Pentru un timp extrem de scurt, s-a reușit să se atingă temperaturi pînă la două milioane de grade.

Temperaturi supraînalte există și în natură, dar nu pe Pămînt, ci pe alte corpuri din univers. În centrul stelelor, în special al Soarelui, temperatura atinge zeci de milioane de grade.

Părțile superficiale ale stelelor au însă o temperatură mult mai joasă, care nu depășește 20 000°C. Suprafața Soarelui are o temperatură pînă la 6 000°C.

Proprietățile unui gaz perfect, pe care ne-am bazat definiția temperaturii, sînt foarte simple. La temperatură constantă, se aplică legea Boyle-Mariotte: produsul pV rămîne constant dacă volumul sau presiunea variază. Dacă presiunea este constantă, cîtul V/T rămîne același, oricum ar varia volumul sau temperatura. Aceste două legi se pot combina cu ușurință într-una singură. Expresia pV/T rămîne aceeași atît la temperatură constantă (V și p variabile), cît și la presiune constantă (V și T variabile). Expresia pV/T rămîne constantă cînd variază nu numai două din mărimile p, V și T, ci și cînd variază toate trei în același timp. Legea $\frac{pV}{T} = \text{const}$, cum se spune, definește ecuația de stare a unui gaz perfect.

Gazul perfect a fost ales ca corp termometric pentru motivul că proprietățile sale depind numai de mișcarea moleculelor (nu și de interacțiunea lor).

Care este însă natura legăturii dintre mișcarea moleculelor și temperatură? Pentru a răspunde la această întrebare, trebuie să găsim legătura dintre mișcarea unui gaz și mișcarea moleculelor gazului respectiv.

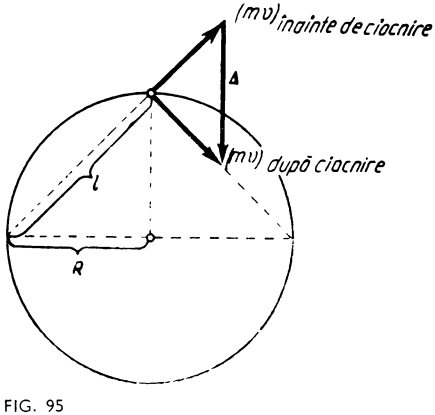


FIG. 95

Într-un vas sferic de rază R sînt închise N molecule de gaz (fig. 95). Să urmărim o moleculă oarecare, de exemplu aceea care se mișcă la un moment dat de la stînga la dreapta de-a lungul unei coarde de lungime l. Nu ne vom îndrepta atenția asupra ciocnirilor moleculelor, deoarece asemenea întîlniri nu influențează mișcarea. După ce a parcurs distanța pînă la limita vasului, molecula se lovește de peretele acestuia și o ia în altă direcție cu aceeași viteză (ciocnirea fiind elastică). În cazul ideal, această călătorie prin vas ar putea continua veșnic. Dacă v este viteza moleculei, fiecare ciocnire cu pereții vasului se va produce la intervale de l/v secunde, adică în fiecare secundă molecula se va ciocni de v/l ori. Grindina

neîncetată de ciocniri ale celor N molecule se transformă într-o forță unică de presiune.

Conform legii lui Newton, o forță este egală cu variația impulsului în unitatea de timp. Să notăm cu $\triangle$ variația impulsului la fiecare ciocnire. Această variație are loc de v/l ori pe secundă. Așadar, adaosul de forță din partea unei molecule va fi $\frac{\Delta}{l} \cdot v$.

În fig. 95 sînt construiți vectorii impulsurilor înainte și după ciocnire, precum și vectorul creșterii Δ a impulsului. Din asemănarea triunghiurilor care s-au format rezultă că $\frac{\Delta}{l} = \frac{mv}{R}$.

Aportul de forță din partea unei molecule ia forma

$$\frac{mv^2}{R}.$$

Întrucît lungimea coardei nu figurează în această formulă, este clar că moleculele care se deplasează pe orice coardă dau același aport de forță. Desigur că variația impulsului în cazul ciocnirii oblice va fi mai mică, în schimb ciocnirile vor fi mai dese în acest caz. Calculul arată că ambele efecte se compensează cu precizie.

Întrucît vasul sferic conține N molecule, forța totală va fi

$$\frac{Nmv^2_{\text{med}}}{R},$$

în care v_{med} este viteza medie a moleculelor.

Presiunea p a gazului, egală cu forța împărțită la suprafața $4\pi R^2$ a sferei, va fi

$$p = \frac{Nmv^2_{\text{med}}}{R \cdot 4\pi R^2} = \frac{\frac{1}{3} Nmv^2_{\text{med}}}{\frac{4}{3} 4\pi R^3} = \frac{Nmv^2_{\text{med}}}{3V},$$

în care V este volumul sferei. Așadar,

$$pV = \frac{4}{3} Nmv^2_{\text{med}}.$$

Această ecuație a fost dedusă pentru prima oară de Daniel Bernoulli în anul 1738[1].

[1] De origine elvețian, D. Bernoulli a lucrat și a trăit în Rusia; el a fost membru al Academiei din Petersburg. Nu mai puțin vestită este activitatea lui Jean Bernoulli și Iacob (Jacques) Bernoulli. Toți trei au fost rude (ultimii doi fiind frați, iar primul — fiul lui Iacob).

Din ecuația de stare a gazului perfect rezultă că $pV = \text{const} \cdot T$, iar din ecuația de mai înainte vedem că pV este proporțional cu v^2_{med}. Așadar,

$$T \sim v^2_{\text{med}} \text{ sau } v_{\text{med}} \sim \sqrt{T},$$

adică viteza medie a moleculelor unui gaz perfect este proporțională cu rădăcina pătrată a temperaturii absolute.

Legea lui Avogadro

Să presupunem că o substanță reprezintă un amestec de diferite molecule. Nu există oare o mărime fizică caracterizînd mișcarea, care să fie aceeași pentru toate aceste molecule, de exemplu pentru hidrogen și oxigen, cînd se găsesc la aceeași temperatură?

Mecanica dă răspuns la această întrebare. Se poate demonstra că sînt identice la toate moleculele energiile cinetice medii $\frac{mv^2_{\text{med}}}{2}$ ale mișcării de translație.

Înseamnă că la o temperatură dată, vitezele medii la pătrat sînt invers proporționale cu masa particulelor:

$$v_{\text{med}} \sim \frac{1}{\sqrt{m}}.$$

Să ne întoarcem acum la ecuația $pV = \frac{1}{3} Nmv^2_{\text{med}}$. Întrucît la o temperatură dată valorile lui mv^2_{med} sînt egale pentru toate gazele, numărul N de molecule cuprinse într-un volum dat, la o anumită presiune p și o anumită temperatură T este același pentru toate gazele. Această lege importantă a fost formulată pentru prima oară de Avogadro.

Cîte molecule revin, însă, la 1 cm³? În 1 cm³ la 0°C și 760 mm Hg se găsesc $2{,}7 \cdot 10^{19}$ molecule. Este un număr enorm. Pentru a vă da seama cît de mare este, vom da următorul exemplu. Să presupunem că un gaz se evacuează dintr-un mic vas cu volumul de 1 cm³, cu o asemenea viteză încît în fiecare secundă părăsesc vasul un milion de molecule. Se calculează ușor că vasul se va goli complet de gaz după un milion de ani.

Legea lui Avogadro arată că, la o anumită presiune și temperatură, raportul N/V dintre numărul de molecule și volumul în care sînt închise are o valoare identică pentru toate gazele.

Întrucît densitatea unui gaz este $\rho = \frac{N}{V} m$, raportul dintre densitățile gazelor este egal cu raportul maselor moleculare ale lor

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{m_1}{m_2}.$$

De aceea, masele moleculare pot fi stabilite prin simpla cîntărire a substanțelor gazoase. Aceste măsurări au jucat la timpul lor un mare rol în dezvoltarea chimiei și au valoare și azi, cînd trebuie să se găsească masa moleculară a unei noi substanțe sintetizate: este suficient să se transforme această substanță, fără a o altera, în stare gazoasă. Aerul este un amestec de gaze, și, pentru a compara densitatea lui cu densitatea altor gaze, este comod să se cunoască masa moleculară medie a aerului. Ea este egală cu 28,8. Cunoscînd această valoare, se găsește cu ușurință densitatea diferitelor gaze în raport cu aerul. De exemplu, vaporii de apă cu masa moleculară 18 au în raport cu aerul densitatea $\frac{18}{28{,}8} = 0{,}62$.

Viteza moleculelor

Teoria arată că la o aceeași temperatură energiile cinetice medii $\frac{mv^2_{\text{med}}}{2}$ ale moleculelor sînt aceleași. Ținînd seama de definiția temperaturii, această energie cinetică medie a mișcării de translație a moleculelor unui gaz este proporțională cu temperatura absolută. Această lege foarte importantă se scrie sub formă de egalitate astfel:

$$\left(\frac{mv^2}{2}\right)_{\text{med}} = 2{,}1 \cdot 10^{-16} T,$$

în care energia se măsoară în ergi.

Mai înainte, am văzut că temperatura este o măsură a intensității mișcării termice. Acum însă vedem că măsurarea temperaturii cu un termometru cu gaz perfect dă acestei măsuri un sens extraordinar de simplu. Temperatura este proporțională cu valoarea medie a energiei mișcării de translație a moleculelor.

Să determinăm viteza medie a moleculelor de oxigen la temperatura camerei, pe care o vom lua rotunjit egală cu $27°C = 300°K$.

Masa moleculară a oxigenului este 32, așa că masa unei molecule este egală cu $32/6 \cdot 10^{23}$. Un calcul simplu dă $v_{med} = 4{,}8 \cdot 10^4$ cm/s, adică circa 500 m/s. Mult mai repede se mișcă moleculele de hidrogen. Masa lor este de 16 ori mai mică, iar viteza de $\sqrt{16} = 4$ ori mai mare, adică la temperatura camerei este de circa 2 km/s. Să calculăm cu ce viteză termică se mișcă o particulă mică vizibilă la microscop. Un microscop obișnuit permite să se vadă un fir de praf cu diametrul de 1 micron ($1\mu = 10^{-4}$ cm). Masa acestei particule, dacă densitatea este apropiată de unitate, este de circa $5 \cdot 10^{-13}$ g. Pentru viteza ei vom obține valoarea de circa 0,5 cm/s. Prin urmare, nu trebuie să ne mire că o astfel de mișcare este perfect vizibilă.

Viteza mișcării browniene a unui bob de mazăre cu masa de 0,1 g va fi doar de 10^{-6} cm/s. Este ușor de înțeles de ce nu vedem mișcarea browniană a unor asemenea particule.

Am vorbit de vitezele medii ale moleculelor, dar nu toate moleculele se mișcă cu aceeași viteză: o parte din ele se mișcă mai repede, iar altă parte mai încet. Evident că toate aceste mișcări se pot calcula. Vom da numai rezultatele acestor calcule.

La o temperatură de circa 15°C, de exemplu, viteza medie a moleculelor de azot este egală cu 500 m/s. Cu viteze de 300 pînă la 700 m/s se mișcă 59% din molecule; cu viteze mici — de la 0 pînă la 200 m/s se mișcă numai 0,6% din molecule; molecule rapide cu viteze de peste 1 000 m/s se găsesc în gaz numai în proporție de 5,4% (fig. 96).

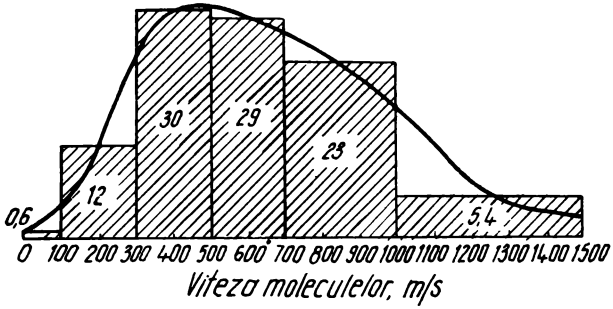


FIG. 96

Se poate calcula și distribuția moleculelor după diferite valori ale energiei mișcării de translație.

Numărul de molecule a căror energie este de mai mult decît de două ori mai mare față de cea medie este mai mic de 10%. Proporția moleculelor și mai „energice" scade pe măsură ce energia

se mărește. Astfel, de exemplu, moleculele a căror energie este de 4 ori mai mare decît cea medie reprezintă doar 0,7%, cele cu o energie de 8 ori mai mare decît cea medie $0{,}06 \cdot 10^{-4}$ %, iar cele cu o energie de 16 ori mai mare decît cea medie, $2 \cdot 10^{-8}$ %.

Energia moleculelor de oxigen, care se mișcă cu viteza de 11 km/s, este egală cu $32 \cdot 10^{-12}$ erg. Energia medie a unei „molecule de 11 km" este cel puțin de 500 de ori mai mare decît energia moleculelor cu viteză medie. Nu este deci de mirare că proporția de molecule cu viteze de peste 11 km/s este inimaginabil de mică, de ordinul a 10^{-300}.

Dar de ce ne interesează viteza de 11 km/s? Mai înainte am spus că se pot desprinde de Pămînt numai corpurile care au această viteză. Așadar, moleculele care s-au ridicat la mare înălțime pot pierde legătura cu Pămîntul și pot porni în călătorii îndepărtate în spațiul interplanetar, dar pentru aceasta trebuie să aibă o viteză de 11 km/s. Dar, după cum am văzut, procentul de molecule de acestea rapide este așa de infim, încît Pămîntul nu e amenințat să-și piardă atmosfera nici peste miliarde de ani.

Viteza de ieșire din atmosferă depinde enorm de energia gravitațională $k \frac{Mm}{r}$. Dacă energia cinetică medie a unei molecule este de un mare număr de ori mai mică decît energia gravitațională, desprinderea moleculei este practic imposibilă. Pe suprafața Lunii, energia gravitațională este de 20 de ori mai mică, ceea ce dă pentru energia de „evadare" a moleculei de oxigen valoarea $1{,}5 \cdot 10^{-12}$ erg. Această valoare depășește valoarea energiei cinetice medii a moleculei doar de 20—25 de ori. Proporția de molecule capabile să se desprindă de Lună este de 10^{-17}. Sîntem departe de 10^{-300}, iar calculul arată că aerul poate evada destul de repede de pe Lună în spațiul interplanetar. Nu este de mirare deci că Luna nu are atmosferă.

Dilatarea termică

Dacă se încălzește un corp, mișcarea atomilor (moleculelor) lui devine mai intensă. Ei încep să se respingă unul pe altul și ocupă un loc mai mare.

Așa se explică faptul binecunoscut că, dacă se încălzesc corpurile solide, lichide și gazoase, ele se dilată.

Nu e nevoie să vorbim prea mult despre dilatarea gazelor, căci proporționalitatea temperaturii cu volumul unui gaz a fost luată ca bază a scării de temperaturi.

Din formula $V = \frac{V_0}{273} \cdot T$ vedem că la presiune constantă, prin încălzirea cu 1°C, volumul gazului crește cu 1/273 parte (adică cu 0,0037) din volumul lui la 0°C (această lege se numește uneori legea Gay-Lussac).

În condiții obișnuite, adică la temperatura camerei și la presiune atmosferică normală, dilatarea majorității lichidelor este de două-trei ori mai mică decît dilatarea gazelor.

Am vorbit de mai multe ori despre dilatarea apei. Cînd se încălzește de la 0° la 4°C, volumul apei se micșorează odată cu încălzirea. Această particularitate a dilatării apei joacă un rol colosal în viața pe Pămînt. Toamna, pe măsură ce apa se răcește, straturile superioare răcite devin mai grele și se duc la fund. În locul lor vine de jos apa mai caldă. Această deplasare are loc însă numai atîta timp cît temperatura apei scade sub 4°C. Dacă temperatura continuă să scadă, straturile superioare nu se vor mai contracta și deci nu vor deveni mai grele și nu vor mai cădea la fund. Începînd de la această temperatură, stratul superior, răcindu-se treptat, ajunge la zero grade și îngheață.

Numai această particularitate a apei împiedică înghețarea rîurilor pînă la fund. Dacă apa și-ar pierde dintr-o dată această însușire importantă, oricine își poate imagina, fără a avea nevoie de prea multă fantezie, ce consecințe dezastruoase ar decurge de aici.

Dilatarea termică a corpurilor solide este mult mai mică decît dilatarea termică a lichidelor. Ea este de sute și mii de ori mai mică decît dilatarea gazelor.

În multe cazuri, dilatarea termică este un fenomen supărător. Astfel, de exemplu, variația dimensiunilor pieselor în mișcare ale mecanismului unui ceas, cînd temperatura variază ar avea ca efect o variație a mersului ceasului, dacă nu s-ar folosi pentru aceste piese fine un aliaj special, numit invar (această denumire este o prescurtare a cuvîntului „invariabil"). Invarul este un oțel cu conținut ridicat de nichel, care se întrebuințează pe scară largă la construcția instrumentelor. O bară de invar se alungește doar cu a milioana parte din lungimea sa la o variație de 1°C a temperaturii.

Dilatarea termică în aparență infimă a corpurilor solide poate avea consecințe serioase. În adevăr, nu e ușor de combătut dilatarea termică a corpurilor solide, din cauza micii lor compresibilități.

Cînd o bară de oțel se încălzește cu 1°C, lungimea sa crește doar cu a suta mia parte, adică cu o cantitate imperceptibilă ochiului. Totuși, pentru a împiedica dilatarea și a comprima bara cu a suta mia parte din lungimea ei, este necesară o forță de 20 kgf pe 1 cm^2.

Și aceasta numai pentru a anihila efectul ridicării temperaturii doar cu 1°C!

Forțele de dilatare care iau naștere din cauza dilatării termice pot provoca ruperi și catastrofe, dacă nu se ține seama de ele. Astfel, de exemplu, pentru a se evita efectul acestor forțe, la șinele liniilor de cale ferată sînt prevăzute mici intervale între ele. Trebuie să se aibă în vedere aceste forțe cînd se umblă cu vase de sticlă, care se crapă ușor cînd sînt încălzite neuniform. De aceea, în practica de laborator se folosesc vase de sticlă de cuarț, care nu are acest defect (cuarțul topit este oxid de siliciu în stare amorfă). La aceeași încălzire, o bară de cupru se alungește cu un milimetru, pe cînd o bară de sticlă de cuarț își modifică lungimea cu 30—40μ, variație imperceptibilă cu ochiul. Dilatarea cuarțului este atît de neînsemnată, încît un vas de cuarț poate fi încălzit la cîteva sute de grade și apoi introdus fără teamă în apă.

Căldura specifică

Energia internă a unui corp depinde, bineînțeles, de temperatură. Cu cît un corp trebuie încălzit mai mult, cu atît este nevoie de mai multă energie. Pentru a-l încălzi de la temperatura T_1 la T_2, trebuie să se comunice corpului, sub formă de căldură, o energie Q egală cu

$$Q = C\,(T_2 - T_1).$$

Aici C este un coeficient de proporționalitate, care se numește capacitatea calorică a corpului. Din această formulă rezultă definiția noțiunii de capacitate calorică: C este cantitatea de căldură necesară pentru ridicarea temperaturii corpului cu 1°C. Capacitatea calorică depinde ea însăși de temperatură: încălzirea de la 0 la 1°C necesită o cantitate de căldură puțin diferită decît încălzirea de la 100 la 101°C.

Valoarea lui C se raportează de obicei la un gram și se numește capacitate calorică specifică sau căldură specifică. Atunci ea se notează cu litera c.

Cantitatea de căldură necesară pentru încălzirea unui corp de masă m se exprimă prin formula

$$Q = mc\,(T_2 — T_1).$$

Valorile căldurilor specifice variază în limite destul de largi. Bineînțeles, căldura specifică a apei, în calorii pe grad este prin definiție egală cu 1.

Majoritatea corpurilor au căldura specifică mai mică decît apa. Astfel, de exemplu, la majoritatea uleiurilor, alcoolurilor și celorlalte lichide, căldurile specifice sînt apropiate de 0,5 cal/g·°C. Cuarțul, sticla, nisipul au o căldură specifică de ordinul 0,2. Căldura specifică a fierului și a cuprului este de circa 0,1 cal/g·°C. Iată și exemple de călduri specifice ale cîtorva gaze: hidrogen 3.4 cal/g·°C, aer 0,24 cal/g·°C.

Căldurile specifice ale tuturor corpurilor se micșorează, de regulă, cu scăderea temperaturii, iar la temperaturi apropiate de zero absolut, la majoritatea corpurilor, iau valori infime. Astfel, căldura specifică a cuprului la temperatura de 20°K este egală doar cu 0,0035; această valoare este de 24 de ori mai mică decît valoarea la temperatura camerei.

Cunoașterea căldurilor specifice poate fi utilă la rezolvarea problemelor în legătură cu distribuția căldurii între corpuri.

Diferența dintre căldura specifică a apei și cea a solului este una din cauzele care determină diferența dintre climatul maritim și cel continental. Avînd o căldură specifică de aproximativ cinci ori mai mare decît solul, apa se încălzește mai încet și se răcește, de asemenea, mai încet.

Vara, în regiunile maritime, încălzindu-se mai încet decît uscatul, apa răcește aerul, iar iarna, apa caldă a mării se răcește treptat, cedînd căldură aerului și temperînd gerul. Este ușor de calculat că 1 m^3 de apă de mare, răcindu-se cu 1°C, încălzește cu 1°C circa 3 000 m^3 de aer. De aceea, în regiunile maritime, oscilațiile temperaturii și diferența dintre temperatura verii și cea a iernii sînt mai puțin importante decît în regiunile continentale.

Conductibilitatea termică

Orice obiect poate servi de „punte" pe care căldura trece de la un corp mai cald la altul mai puțin cald.

O astfel de punte este, de exemplu, linguriță de ceai cufundată în paharul cu ceai fierbinte. Obiectele de metal conduc foarte bine căldura. Capătul linguriței necufundat în pahar devine cald chiar după o secundă.

Dacă este nevoie să se amestece un lichid fierbinte oarecare, mînerul amestecătorului trebuie să se facă din lemn sau din masă plastică. Aceste corpuri solide conduc căldura de 1 000 de ori mai prost decît metalele. Spunem „conduc căldura", dar s-ar putea

spune tot atît de bine „conduc frigul". Firește, proprietățile unui corp nu se schimbă după sensul în care merge prin el fluxul de căldură. În zilele geroase ne ferim să atingem pe stradă cu mîna goală un metal, dar apucăm fără sfială un mîner de lemn.

Dintre conducătoarele rele de căldură — ele se mai numesc și izolatoare termice — fac parte lemnul, cărămida, sticla și masele plastice. Din aceste materiale se fac pereții caselor, ai sobelor și răcitoarelor.

Printre bunele conducătoare de căldură se numără toate metalele. Cele mai bune conducătoare sînt cuprul și argintul; ele conduc căldura de două ori mai bine decît fierul.

Desigur că nu numai un corp solid poate servi ca „punte" pentru trecerea căldurii. Lichidele conduc și ele căldura, dar mult mai prost decît metalele. În privința conductibilității căldurii, metalele sînt de sute de ori mai bune decît corpurile nemetalice solide și lichide.

Pentru a arăta conductibilitatea termică slabă a apei se face următoarea experiență. Într-o eprubetă cu apă se fixează pe fund o bucățică de gheață, iar partea de sus a eprubetei se încălzește la un arzător de gaze; apa începe să fiarbă, dar gheața nici gînd n-are să se topească. Dacă eprubeta ar fi fără apă și făcută din metal, bucățica de gheață ar începe să se topească aproape instantaneu. Apa conduce căldura aproximativ de două sute de ori mai prost decît cuprul.

Gazele conduc căldura de zeci de ori mai prost decît corpurile nemetalice condensate. Conductibilitatea termică a aerului este de 20 000 mai mică decît conductibilitatea termică a cuprului.

Conductibilitatea termică rea a gazelor permite să se ia în mînă o bucată de gheață carbonică, a cărei temperatură este de —78°C și chiar să se țină în palmă o picătură de azot lichid avînd temperatura de —196°C. Dacă nu se strîng în mînă aceste corpuri reci, nu se simte nici o „arsură". Explicația constă în faptul că, atunci cînd fierberea este foarte energică, picătura de lichid sau bucata de corp solid se acoperă cu o „cămașă de vapori", iar stratul de gaz, care se formează, servește de izolator termic.

Starea sferoidală a lichidului — așa se numește starea în care picăturile sînt învelite în vapori — ia naștere în cazul în care apa cade, de exemplu, pe o tigaie încinsă. O picătură de apă clocotită căzînd în palmă opărește mîna, deși diferența de temperatură dintre apa clocotită și corpul omenesc este mai mică decît diferența de temperatură dintre mînă și aerul lichid. Mîna este mai rece decît picătura de apă clocotită, așa că picătura pierde căldură, fierberea încetează și nu se formează o cămașă de vapori.

Cel mai bun izolator termic este vidul. În vid nu există agenți de transmisie a căldurii, iar conductibilitatea termică este minimă.

Prin urmare, dacă vrem să avem o protecție termică, să ferim ceva cald de ceva rece sau ceva rece de ceva cald, cel mai bun lucru este să construim un înveliș cu pereți dubli și să scoatem aerul din spațiul dintre acești pereți. În acest caz constatăm următorul fapt interesant. Dacă pe măsură ce gazul se rarefiază urmărim variația conductibilității sale termice, observăm că pînă în momentul cînd presiunea ajunge la cîțiva milimetri de coloană de mercur, conductibilitatea termică aproape nu variază; numai cînd se trece la un vid mai înaintat, așteptările noastre se îndeplinesc, adică conductibilitatea termică scade brusc.

Care este explicația?

Pentru a înțelege acest fenomen, este necesar să încercăm să ne imaginăm intuitiv în ce constă fenomenul transmisiei căldurii într-un gaz.

Transmisia căldurii de la un punct cald la altul rece are loc prin transmiterea energiei de la o moleculă la cea vecină. Bineînțeles că ciocnirile moleculelor rapide cu cele lente au ca efect accelerarea moleculelor lente și întîrzierea mișcării moleculelor rapide. Dar aceasta înseamnă că punctul cald devine rece, iar cel rece se încălzește.

Ce efect are însă micșorarea presiunii asupra transmisiei căldurii? Întrucît micșorarea presiunii face să scadă densitatea, se micșorează și numărul de întîlniri dintre moleculele rapide și cele lente în timpul cărora se produce transmisia energiei. Din această cauză, conductibilitatea termică ar urma să se micșoreze. Dar, pe de altă parte, micșorarea presiunii are ca rezultat mărirea drumului liber al moleculelor, care, așadar, transmit căldura la distanțe mai mari, iar aceasta contribuie la mărirea conductibilității termice. Calculul arată că cele două efecte se echilibrează, iar capacitatea de transmisie a căldurii rămîne cîtăva vreme neschimbată în timpul pompării aerului din vasul în care se face vid.

Aceasta va fi situația pînă ce vidul devine așa de înaintat, încît drumul liber ajunge egal cu distanța dintre pereții vasului. Acum continuarea scăderii presiunii nu mai poate modifica drumul liber al moleculelor care „hoinăresc" între pereți, scăderea densității nu se mai „echilibrează", iar conductibilitatea termică scade repede proporțional cu presiunea, atingînd valori infime cînd se ajunge la vid înaintat. Vasele numite „termos" se bazează tocmai pe folosirea vidului. Aceste vase sînt foarte răspîndite; ele se întrebuințează nu numai pentru păstrarea alimentelor calde sau reci,

ci și în știință și tehnică. În acest caz, ele se numesc, după numele inventatorului, vase „*dewar*". În astfel de vase se transportă aerul, azotul și oxigenul lichid. Mai tîrziu vom arăta în ce mod se obțin aceste gaze în stare lichidă [1].

Convecția

Dacă apa este un conducător de căldură așa de rău, cum se încălzește apa dintr-un ceainic? Aerul conduce și mai rău căldura; atunci cum se explică faptul că iarna se stabilește o temperatură uniformă în toate punctele unei camere?

Apa din ceainic fierbe repede din cauza atracției Pămîntului. Straturile inferioare de apă încălzindu-se, se dilată, devin mai ușoare și se ridică în sus, iar în locul lor vine apa rece. Încălzirea rapidă se produce numai datorită convecției (cuvînt latinesc însemnînd „amestecare"). Într-o rachetă interplanetară nu este așa de ușor de încălzit apa dintr-un ceainic.

Despre un alt caz de convecție a apei am vorbit, fără să pomenim acest cuvînt, ceva mai înainte, cînd am explicat de ce rîurile nu îngheață pînă la fund.

De ce radiatoarele de calorifer se montează lîngă podea, iar ochiurile de ventilație se pun la partea de sus a ferestrelor? Poate ar fi mai comod de deschis ochiul de ventilație dacă s-ar găsi la partea de jos a ferestrei, iar radiatorul, ca să nu încurce locul, ar fi mai bine să fie montat în tavan.

Dacă am da ascultare unor astfel de sfaturi, am constata repede că radiatorul n-ar încălzi camera, care nici nu s-ar ventila cu fereastra deschisă.

Cu aerul din cameră se petrece același lucru că și cu apa din ceainic. Cînd se pune în funcțiune radiatorul de calorifer, aerul din straturile inferioare ale camerei începe să se încălzească, se dilată, devine mai ușor și se ridică în sus, spre plafon. Locul lui este luat de straturile mai grele de aer rece. Acestea, la rîndul lor, încălzindu-se, se ridică spre plafon. Așadar, în cameră ia

[1] Oricine a văzut baloanele de sticlă din termosuri a observat că întotdeauna pereții sînt argintați. De ce? Pentru că conductibilitatea termică despre care am vorbit nu este singurul mijloc de transmisie a căldurii. Mai există și alt mijloc de transmisie, și anume așa-numita radiație. În condiții obișnuite, ea este mult mai slabă decît conductibilitatea termică, totuși este destul de importantă. Tocmai pentru atenuarea radiației se argintează pereții termosului.

naștere un curent neîntrerupt de aer cald de jos în sus și de aer rece de sus în jos. Cînd deschidem ochiul de ventilație în timpul iernii, lăsăm să intre în cameră un curent de aer rece. Acesta este mai greu decît aerul din cameră și se lasă în jos, refulînd aerul cald care se ridică în sus și iese prin ochiul de ventilație.

O lampă cu petrol arde bine numai atunci cînd are o sticlă înaltă de lampă. Nu trebuie să se creadă că sticla este necesară numai pentru a apăra flacăra de vînt. Chiar cînd nu adie nici un pic de vînt, strălucirea luminii crește imediat îndată ce se pune sticla de lampă. Rolul sticlei constă în a intensifica aportul de aer la flacără, adică de a produce tiraj. Acesta ia naștere din cauză că aerul din interiorul sticlei, devenit mai sărac în oxigen, care s-a consumat în procesul arderii, se încălzește repede și se ridică în sus, iar în locul lui vine aer rece pur prin orificiile cu care este prevăzută mașina lămpii.

Cu cît sticla este mai înaltă, cu atît lampa arde mai bine. În adevăr, viteza cu care aerul rece pătrunde în mașina lămpii depinde de diferența de greutate dintre coloana de aer cald din lampă și aerul rece dinafara lămpii. Cu cît coloana este mai înaltă, cu atît această diferență de greutate este mai mare și totodată este mai mare și viteza de deplasare a aerului în sticla de lampă.

De aceea și coșurile de fabrică se fac înalte. La focarele fabricilor e necesar un curent de aer proaspăt deosebit de puternic și un tiraj bun. Acesta este asigurat de coșurile înalte.

Lipsa convecției într-o rachetă în care nu există gravitație nu permite folosirea chibriturilor, a lămpilor și a arzătoarelor de gaze, deoarece produsele arderii înăbușă flacăra.

Aerul este rău conducător de căldură; cu ajutorul lui putem conserva căldura, dar cu o condiție: să evităm convecția, adică amestecarea aerului cald cu cel rece, fenomen care reduce la zero proprietățile de izolator termic ale aerului.

Suprimarea convecției se realizează prin folosirea a tot felul de corpuri poroase și fibroase. În interiorul acestor corpuri, aerul nu se poate deplasa decît cu mare greutate. Toate aceste corpuri sînt bune ca izolatoare termice numai datorită proprietăților lor de a ține pe loc straturile de aer. Conductibilitatea termică a substanțelor din care sînt făcute fibrele sau pereții porilor însă poate fi destul de mare.

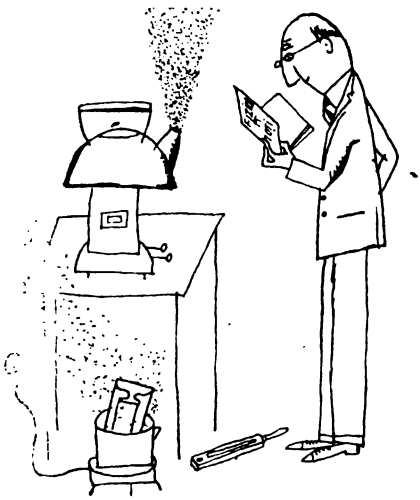
O șubă de blană deasă care conține cît mai multe fire de păr e bună; puful de eider (rață polară) permite să se facă saci de dormit călduroși, în greutate mai mică de o jumătate de kilogram, din cauza finețiii extraordinare a firișoarelor lor. O jumătate de

kilogram din acest puf poate „reține" tot atîta aer cît zeci de kilograme de vatelină.

Pentru micșorarea convecției se fac ferestre duble. Aerul dintre geamuri nu ia parte la amestecarea straturilor de aer care are loc în cameră.

Dimpotrivă, orice mișcare a aerului intensifică amestecarea și mărește transmisia de căldură. Tocmai de aceea, cînd avem nevoie să îndepărtăm repede căldura, ne facem vînt cu evantaiul sau pornim ventilatorul. De aceea, vîntul ne dă impresia de răcoare. Dacă însă temperatura aerului este mai mare decît temperatura corpului nostru, amestecarea are efectul contrar și vîntul se simte ca o răsuflare fierbinte.

Scopul funcționării unui cazan de abur este obținerea cît mai grabnică de vapori încălziți la temperatura necesară. Convecția naturală în cîmpul gravitației este complet insuficientă în acest scop. De aceea, crearea unei circulații intense a apei și a aburului, care are ca rezultat amestecarea straturilor calde cu cele reci este una dintre problemele fundamentale de rezolvat cînd se proiectează cazane cu abur.



Vaporii de fier și aerul solid

Nu-i așa că această împerechere de cuvinte este ciudată? Să nu credeți însă că ele sînt simple palavre: atît vaporii de fier, cît și aerul solid există în natură, dar nu în condiții normale.

Despre ce condiții este însă vorba? Starea substanței este determinată de două elemente: de temperatură și de presiune.

Viața noastră se desfășoară în condiții care variază relativ puțin. Presiunea aerului oscilează cu cîteva procente în jurul unei atmosfere (1 kgf/cm²); temperatura aerului, să zicem, în regiunea Moscovei este cuprinsă între —30° și +30°; pe scara absolută a temperaturilor, la care s-a luat ca zero temperatura cea mai joasă posibilă (—273°), acest interval pare mai puțin impresionant: 240—300°K, ceea ce de asemenea reprezintă $\pm$ 10% din valoarea medie.

E perfect natural că ne-am obișnuit cu aceste condiții normale și de aceea cînd exprimăm adevăruri simple de genul: „fierul este un corp solid, iar aerul este un gaz" ș.a.m.d. uităm să adăugăm: „în condiții normale".

Dacă se încălzește fierul, el mai întîi se topește, iar după aceea se evaporă. Dacă se răcește aerul, el mai întîi se transformă în lichid și apoi se solidifică.

Chiar dacă cititorul n-a văzut niciodată vapori de fier sau aer solid, el va crede, probabil, fără dificultate că orice substanță

se poate obține, prin variația temperaturii sale, atît în stare solidă, cît și în stare lichidă sau gazoasă, sau, cum se spune, în fază lichidă, solidă sau gazoasă.

E ușor de crezut acest lucru, deoarece oricine a văzut o substanță fără care viața pe Pămînt ar fi imposibilă, atît sub formă de gaz, cît și ca lichid și sub formă de corp solid. Este vorba, firește, de apă.

În ce condiții însă se produce transformarea substanței dintr-o stare într-alta?

Fierberea

Dacă se cufundă un termometru în apa turnată într-un ceainic, dacă se pune reșoul electric la priză și dacă se observă mercurul termometrului, se constată următorul lucru: nivelul mercurului „sare" aproape imediat în sus. El indică deja 90°, 95° și, în sfîrșit, 100°. Apa începe să fiarbă și, în același timp, ridicarea mercurului încetează. Apa fierbe de mai multe minute, dar nivelul mercurului nu variază. Atîta timp cît apa fierbe, temperatura nu se modifică (fig. 97).

Ce se face cu căldura, dacă temperatura apei nu variază? Răspunsul este evident. Procesul de transformare a apei în vapori necesită energie.

Să comparăm energia unui gram de apă și a unui gram de vapori care s-au format din ea. Moleculele vaporilor sînt situate la distanțe mai mari una de alta decît moleculele de apă. Bineînțeles, că din această cauză, energia potențială a apei diferă de energia potențială a vaporilor.

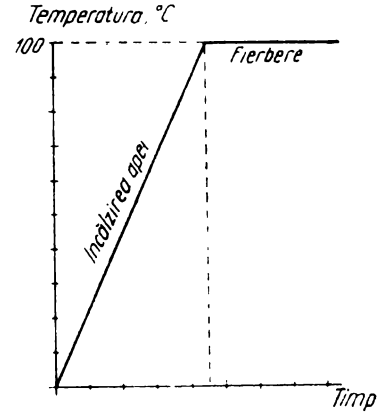


FIG. 97

Energia potențială a particulelor care se atrag se micșorează pe măsură ce acestea se apropie. De aceea, energia vaporilor este mai mare decît energia apei, iar transformarea apei în vapori necesită energie. Acest surplus de energie este comunicat de reșoul electric apei care fierbe în ceainic.

Energia necesară pentru transformarea apei în vapori se numește căldură de vaporizare. Pentru transformarea a 1 g de apă în vapori sînt necesare 539 cal (aceasta este valoarea pentru temperatura de 100°C).

Dacă 539 cal sînt necesare pentru 1 g, pentru o moleculă-gram de apă se vor consuma 18 539 = 9 700 cal. Această cantitate de căldură trebuie consumată pentru ruperea legăturilor intramoleculare.

Se poate compara această valoare cu *m* lucrul mecanic necesar pentru ruperea legăturilor intramoleculare. Pentru a se disocia în atomi o moleculă-gram de vapori de apă sînt necesare circa 220 000 cal, adică o energie de 25 de ori mai mare. Aceasta dovedește direct cît de slabe sînt forțele care leagă moleculele între ele, în comparație cu forțele care leagă atomii în moleculă.

•

Variația temperaturii de fierbere în funcție de presiune

Temperatura de fierbere a apei este egală cu 100°C. S-ar putea crede că aceasta este o proprietate inalienabilă a apei, că apa, oriunde și în orice condiții s-ar găsi, va fierbe întotdeauna la 100°C.

Lucrurile nu stau însă așa și asta o știu perfect locuitorii localităților de munte de mare altitudine.

În apropiere de vîrful muntelui Elbrus se găsește o cabană pentru turiști și o stațiune științifică. Novicii se miră uneori „ce greu fierbe un ou în apa clocotită" sau „de ce apa clocotită nu frige". În aceste cazuri li se spune că apa fierbe la 82°C pe vîrful muntelui Elbrus.

Care este cauza? Ce factor fizic intervine în fenomenul fierberii? Ce importanță are înălțimea deasupra nivelului mării?

Acest factor fizic este presiunea care acționează asupra suprafeței lichidului. Nu e nevoie să ne urcăm pe vîrful unui munte pentru a verifica adevărul acestei afirmații.

Punînd un vas cu apă încălzită sub un clopot și pompînd aer sub clopot sau de sub el, ne putem convinge că temperatura de fierbere crește cînd presiunea se mărește și scade cînd presiunea se micșorează.

Apa fierbe la 100°C numai la o anumită presiune — la 760 mm Hg.

Curba temperaturii de fierbere în funcție de presiune este reprezentată în fig. 98. Pe vîrful muntelui Elbrus presiunea este egală cu 0,5 atm, iar acestei presiuni îi corespunde temperatura de fierbere de 82°C.

Dar cu apa care fierbe la 10—15 mm Hg te poți răcori cînd vremea e călduroasă. La această presiune, temperatura de fierbere scade la 10—15°C.

Se poate obține chiar o „apă clocotită", avînd temperatura la care apa îngheață. În acest scop este necesar să se scadă presiunea la 4,6 mm Hg.

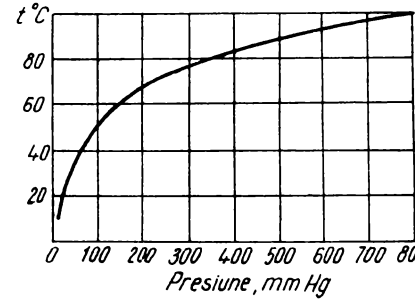


FIG. 98

O situație interesantă se poate observa dacă se pune un vas deschis, cu apă, sub un clopot și se scoate aerul cu o pompă. Scoaterea aerului silește apa să înceapă să fiarbă, dar pentru ca apa să continue să fiarbă, este nevoie de căldură. Această căldură nu are de unde să fie luată și atunci trebuie să i se cedeze apei energia celui ce pompează aerul. Temperatura apei care fierbe începe să scadă, dar întrucît pomparea continuă, scade și presiunea. De aceea, fierberea nu se întrerupe, dar apa continuă să se răcească și în cele din urmă îngheață.

Această fierbere a apei se produce numai în cazul pompării aerului de sub clopot. De exemplu, cînd elicea unui vapor se învîrtește, presiunea în stratul de apă, care se mișcă repede în jurul suprafeței metalice a elicei, scade foarte mult, iar apa din acest strat începe să fiarbă, adică apar în ea numeroase bule umplute cu vapori. Acest fenomen se numește cavitație (de la cuvîntul latinesc *cavitas* = cavitate).

Reducînd presiunea, facem să scadă temperatura de fierbere. Dar dacă mărim presiunea? O diagramă asemănătoare cu cea de mai sus dă răspuns la această întrebare. O presiune de 15 atm poate întîrzia fierberea, care va începe la 200°C, iar o presiune de 80 atm va face să înceapă să fiarbă la 300°C.

Așadar, la o anumită valoare a presiunii exterioare corespunde o anumită temperatură de fierbere. Această afirmație poate fi însă și inversată, spunînd astfel: fiecărei temperaturi de fierbere îi corespunde o anumită presiune. Această presiune se numește tensiunea vaporilor.

Curba care reprezintă temperatura de fierbere în funcție de presiune este în același timp și curba tensiunii vaporilor în funcție de temperatură.

Valorile care figurează pe diagrama fierberii (sau pe diagrama tensiunii vaporilor) arată că tensiunea vaporilor variază foarte mult cînd temperatura variază. La 0°C (adică 273°K), tensiunea vaporilor este egală cu 4,6 mm Hg, iar la 100°C (373°K), ea este egală cu 760 mm Hg, adică crește de 165 de ori. Cînd temperatura crește de două ori (de la 0°C, adică 273°K, la 273°C, adică 546°K), tensiunea vaporilor crește de la 4,6 mm Hg aproape pînă la 60 atm, adică aproximativ de 10 000 de ori.

Dimpotrivă, temperatura de fierbere variază destul de încet cu presiunea. Cînd presiunea se dublează, trecînd de la 0,5 atm la 1 atm, temperatura de fierbere crește de la 82°C (adică 355°K) la 100°C (adică 373°K), iar cînd se dublează, trecînd de la 1 atm la 2 atm, temperatura de fierbere crește de la 100°C (adică 373°K) la 120°C (adică 393°K).

Aceeași curbă pe care o analizăm acum servește și pentru condensarea vaporilor de apă.

Vaporii se pot transforma în apă fie prin comprimare, fie prin răcire.

Atît în timpul fierberii, cît și în cursul condensării, punctul nu se deplasează de pe curbă pînă ce transformarea vaporilor în apă sau a apei în vapori nu se termină complet. Acest lucru se mai poate formula și astfel: în condițiile curbei noastre și numai în aceste condiții este posibilă coexistența lichidului și a vaporilor. Dacă în acest timp nu se aduce și nici nu se sustrage căldură, cantitatea de vapori și de lichid dintr-un vas închis rămîne constantă. Despre astfel de vapori și lichid se spune că se găsesc în echilibru, iar vaporii care se găsesc în echilibru cu lichidul respectiv se numesc saturanți.

Curba fierberii și a condensării are, după cum vedem, încă un înțeles: ea este curba de echilibru a unui lichid cu vaporii săi. Curba de echilibru împarte cîmpul diagramei în două părți. La stînga și deasupra curbei (spre temperaturile mai mari și presiunile mai mici) este situat domeniul stării stabile a vaporilor, iar la dreapta și dedesubt se găsește domeniul stării stabile a lichidului.

Curba de echilibru vapori-lichid, adică curba variației temperaturii de fierbere în funcție de presiune sau, ceea ce e același lucru, a variației tensiunii vaporilor în funcție de temperatură este aproximativ identică pentru toate lichidele. În unele cazuri, variația poate fi ceva mai pronunțată, în altele ceva mai lentă,

dar întotdeauna tensiunea vaporilor crește repede cu creșterea temperaturii.

Ne-am servit deja de numeroase ori de cuvintele „gaz" și „vapori". Aceste două cuvinte sînt relativ echivalente. Se poate spune: gazul de apă este același lucru cu vaporii de apă, gazul oxigen reprezintă vaporii lichidului oxigen. Totuși în folosirea acestor două cuvinte s-a stabilit un anumit obicei. Întrucît sîntem obișnuiți cu un anumit interval relativ restrîns de temperaturi, aplicăm de obicei cuvîntul „gaz" la acele substanțe la care tensiunea vaporilor la temperaturi ordinare este mai mare decît presiunea atmosferică. Dimpotrivă, vorbim despre vapori atunci cînd la temperatura camerei și la presiunea atmosferică, substanța respectivă este mai stabilă sub formă de lichid.

Evaporarea

Fierberea este un proces rapid și din apa care fierbe în scurt timp nu rămîne nici urmă, căci se transformă în vapori.

Există însă și alt fenomen de transformare a apei sau a altui lichid în vapori: evaporarea. Evaporarea are loc la orice temperatură, independent de presiune, care în condiții obișnuite este întotdeauna apropiată de 760 mm Hg. Spre deosebire de fierbere, evaporarea este un proces foarte lent. Un flacon cu apă de colonie pe care l-am uitat destupat rămîne gol după cîteva zile; o farfurie cu apă stă mai multă vreme cu apă, dar mai curînd sau mai tîrziu și ea devine uscată.

În procesul evaporării joacă un mare rol aerul. Simpla lui prezență nu împiedică evaporarea apei. Îndată ce suprafața lichidului rămîne descoperită, moleculele de apă încep să migreze în stratul de aer cel mai apropiat. Densitatea vaporilor în acest strat crește repede; după un scurt timp, presiunea vaporilor devine egală cu tensiunea lor caracteristică pentru temperatura respectivă a mediului. Totodată, tensiunea vaporilor va fi exact aceeași ca în cazul în care lipsește aerul.

Trecerea vaporilor în aer nu înseamnă, desigur, că presiunea crește. Presiunea totală în spațiul de deasupra suprafeței apei nu crește, ci se mărește numai partea de presiune care revine vaporilor și se micșorează în mod corespunzător partea ce revine aerului, care este refulat de vapori.

Deasupra apei se găsesc vapori amestecați cu aer, iar mai sus se găsește un strat de aer fără vapori. Aceste două straturi se

vor amesteca inevitabil. Vaporii de apă vor trece neîncetat în straturile mai înalte, iar în locul lor, în stratul inferior, va pătrunde aer care nu conține vapori de apă. De aceea, în stratul cel mai apropiat de apă se va libera tot timpul loc pentru noi molecule de apă. Apa se va evapora neîncetat, menținînd presiunea vaporilor de apă la suprafață egală cu tensiunea vaporilor, iar procesul va continua pînă ce apa se va evapora complet.

Am început cu exemplul cu apa de colonie și cu apa. Se știe că aceste lichide se evaporă cu viteze diferite. Extraordinar de repede se volatilizează eterul, destul de repede se vaporizează alcoolul și mult mai încet apa. Vom înțelege imediat despre ce este vorba, dacă vom căuta într-un îndreptar valorile tensiunilor de vapori ale acestor lichide, să zicem, la temperatura camerei. Iată aceste valori: eterul 437 mm Hg, alcoolul 44,5 mm Hg, iar apa 17,5 mm Hg.

Cu cît tensiunea de vapori este mai mare, cu atît se găsesc mai mulți vapori în stratul de aer alăturat și cu atît lichidul se evaporă mai repede. Știm că tensiunea de vapori crește cu ridicarea temperaturii. Se înțelege deci de ce viteza de evaporare se mărește cînd lichidul se încălzește.

Asupra vitezei de evaporare se poate influența și în alt mod. Dacă vrem să înlesnim evaporarea, trebuie să îndepărtăm mai repede vaporii de la suprafața lichidului, adică să accelerăm deplasarea aerului. Tocmai de aceea evaporarea este accelerată prin suflare asupra lichidului. Apa, deși are o tensiune de vapori relativ mică, se evaporă destul de repede dacă se expune farfurioara la vînt.

Se înțelege deci de ce un înotător care iese din apă simte frig cînd îl bate vîntul. Vîntul grăbește deplasarea aerului încărcat cu vapori și astfel face ca evaporarea să aibă loc mai repede, iar căldura necesară pentru evaporare este silit s-o cedeze corpul omului.

Starea generală a unui om depinde de cantitatea mare sau mică de vapori care se găsesc în aer. Atît aerul prea uscat, cît și cel prea umed este neplăcut. Umiditatea se consideră normală cînd este egală cu 60%. Aceasta înseamnă că densitatea vaporilor de apă reprezintă 60% din densitatea vaporilor saturanți de apă la aceeași temperatură.

Dacă se răcește aerul umed, în cele din urmă, presiunea vaporilor de apă din el devine egală cu tensiunea de vapori la acea temperatură. Vaporii devin saturanți și, dacă temperatura scade mai departe, încep să se condenseze. Roua dimineții, care umezește iarba și frunzele plantelor, apare tocmai datorită acestui fenomen.

La 20°C, densitatea vaporilor saturanți de apă este de circa 0,000 02 g/cm³. Ne vom simți bine dacă proporția de vapori de apă din aer este de 60% din această valoare, adică ceva mai mult decît a suta mia parte dintr-un gram în 1 cm³.

Deși această cifră este mică, ea reprezintă pentru o cameră o cantitate impresionantă de apă. Nu este greu de calculat că într-o cameră de dimensiuni mijlocii, cu suprafața de 12 m² și înălțimea de 3 m poate „încăpea" sub formă de vapori saturanți circa 1 kg de apă.

Așadar, dacă se închide ermetic o astfel de cameră și se pune în ea un butoi cu apă, se evaporă un litru de apă, oricare ar fi capacitatea butoiului.

E interesant de comparat acest rezultat pentru apă cu valorile corespunzătoare pentru mercur. La aceeași temperatură de 20°C, densitatea vaporilor saturanți de mercur este de 10^{-8} g/cm³. În camera de care a fost vorba mai înainte va încăpea cel mult 1 g de mercur.

În treacăt fie zis, vaporii de mercur sînt foarte otrăvitori și 1 g de vapori de mercur poate dăuna serios sănătății oricărui om. Cînd se lucrează cu mercur, trebuie să se bage de seamă ca nici cea mai mică picătură de mercur să nu se risipească.

Temperatura critică

Cum se poate transforma un gaz în lichid? Diagrama fierberii răspunde la această întrebare. Un gaz se poate transforma în lichid, fie micșorînd temperatura, fie mărind presiunea.

În secolul al XIX-lea, ridicarea presiunii era o problemă mult mai ușoară decît coborîrea temperaturii. La începutul secolului actual, marele fizician englez Michael Faraday a reușit să comprime gazele pînă la valoarea tensiunii de vapori și să transforme în modul acesta în lichid o mulțime de gaze (clor, bioxid de carbon etc.).

Unele gaze însă — hidrogenul, azotul, oxigenul — nu voiau în nici un chip să se lichefieze. Oricît se mărea presiunea, ele nu se transformau în lichid. S-ar fi putut crede că oxigenul și alte gaze nu pot fi lichefiate. Ele erau considerate ca gaze reale sau permanente.

În realitate însă insuccesele se datorau neînțelegerii unui fapt important,

Să considerăm un lichid şi vaporii lui, aflaţi în echilibru şi să ne gîndim ce se întîmplă cu ele cînd creşte temperatura de fierbere şi, bineînţeles, cînd presiunea creşte în mod corespunzător. Cu alte cuvinte, să ne închipuim că punctul de pe diagrama fierberii se deplasează de-a lungul curbei în sus. E clar că, dacă temperatura se ridică, lichidul se dilată, iar densitatea lui scade. În ce priveşte însă vaporii, mărirea temperaturii de fierbere, bineînţeles, favorizează dilatarea lor. dar, după cum am mai spus, presiunea vaporilor saturanţi creşte mult mai repede decît temperatura de fierbere. De aceea, densitatea vaporilor nu scade, ci, dimpotrivă, creşte repede pe măsură ce temperatura de fierbere se ridică.

Întrucît densitatea lichidului scade, iar densitatea vaporilor creşte, înseamnă că, ridicîndu-ne „în sus" pe curba fierberii, vom ajunge inevitabil la un punct în care densităţile lichidului şi vaporilor devin egale (fig. 99).

În acest punct important, care se numeşte punct critic, curba fierberii se întrerupe. Întrucît toate diferenţele dintre gaz şi lichid sînt în legătură cu diferenţa de densitate, în punctul critic, proprietăţile lichidului şi ale gazului devin identice. Pentru fiecare substanţă există o temperatură critică proprie şi o presiune critică proprie. Astfel, pentru apă, punctul critic corespunde temperaturii de 374°C şi presiunii de 218,5 atm.

Dacă se comprimă un gaz a cărui temperatură este inferioară celei critice, procesul lui de compresiune este reprezentat prin săgeata care intersectează curba fierberii (fig. 100). În momentul

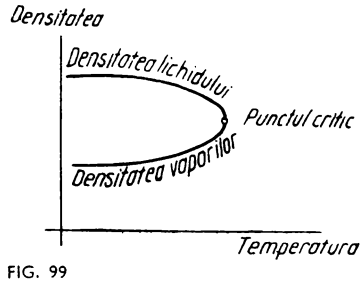


FIG. 99

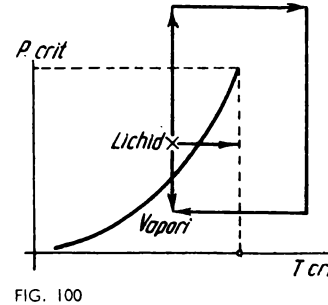


FIG. 100

cînd se atinge o presiune egală cu tensiunea vaporilor (punctul de intersecţie a săgeţii cu curba fierberii), gazul începe să se condenseze, transformîndu-se în lichid. Dacă vasul nostru ar fi transparent, în acest moment am vedea că începe să se formeze un strat de lichid pe fundul vasului. Dacă presiunea

se menține constantă, stratul de lichid crește pînă ce, în cele din urmă, tot gazul se transformă în lichid. Comprimarea mai departe necesită mărirea presiunii.

Cu totul altfel stau lucrurile în cazul comprimării unui gaz a cărui temperatură este superioară celei critice. Procesul de compresiune se poate figura din nou sub formă de săgeată, dar dirijată de jos în sus. Acum însă săgeata nu mai intersectează curba fierberii. Așadar, prin compresiune, vaporii nu se vor condensa, ci numai vor deveni din ce în ce mai denși.

La temperaturi mai ridicate decît cea critică este imposibilă existența simultană a lichidului și gazului, care sînt despărțite de o limită de separație. În timpul comprimării pînă la orice densitate, sub piston se va găsi o substanță omogenă și va fi greu de spus cînd ea se poate numi gaz și cînd lichid.

Existența punctului critic arată că între starea lichidă și cea gazoasă nu există o diferență principială. La prima vedere s-ar putea arăta că o astfel de diferență principială nu ar exista decît doar în cazul în care este vorba de temperaturi mai ridicate decît cea critică. În realitate însă lucrurile stau într-altfel. Existența punctului critic indică posibilitatea de transformare a unui lichid — cel mai real lichid, care se poate turna în pahar — în stare gazoasă, fără cea mai mică urmă de fierbere.

Acest mod de transformare este arătat în fig. 100. Cu cruciuliță este însemnat un lichid notoriu. Dacă se scade puțin presiunea (săgeata îndreptată în jos), lichidul începe să fiarbă, dar el începe să fiarbă și în cazul în care se ridică puțin temperatura (săgeata îndreptată spre dreapta). Noi însă vom proceda cu totul altfel. Vom comprima lichidul foarte puternic pînă la o presiune mai mare decît cea critică. Punctul care reprezintă starea lichidului se va ridica pe verticală în sus. Apoi vom încălzi lichidul; acest proces este reprezentat de o linie orizontală. Acum, după ce am ajuns la dreapta temperaturii critice, scădem presiunea pînă la cea inițială. Dacă acum reducem temperatura, obținem vaporii cei mai adevărați care se pot obține din acest lichid, pe o cale mai simplă și mai scurtă.

Așadar, întotdeauna este posibil ca, modificînd presiunea și temperatura, dar ocolind punctul critic, să se obțină vapori prin trecerea neîntreruptă din stare lichidă în stare gazoasă sau să se obțină lichid din vapori. Pentru această transformare neîntreruptă, nu este nevoie de fierbere sau de condensare.

Încercările mai vechi de lichefiere a unor gaze ca oxigenul, azotul și hidrogenul n-au fost încununate de succes, din cauză că nu se

cunoștea existența temperaturii critice. Temperatura critică a acestor gaze este foarte joasă: la azot — 147°C, la oxigen —119°C, iar la hidrogen —240°C sau 33°K. Recordul îl deține heliul, care are temperatura critică de 4,3°K. Aceste gaze se pot transforma în lichid printr-o singură metodă: trebuie să li se scadă temperatura sub cea critică.

Obținerea temperaturilor joase

Se poate obține o scădere serioasă a temperaturii prin diferite mijloace, dar ideea pe care se bazează toate metodele este una și aceeași: trebuie să silim corpul pe care dorim să-l răcim să-și cheltuiască energia internă.

Cum se poate face acest lucru? Una dintre metode este să se oblige lichidul să fiarbă fără a i se furniza căldură dinafară. În acest scop, după cum știm, trebuie să se micșoreze presiunea, adică să se reducă pînă la valoarea tensiunii de vapori. Căldura cheltuită pentru fierbere va fi împrumutată de la lichid, iar temperatura lichidului și a vaporilor, și o dată cu ea și tensiunea de vapori, vor scădea. De aceea, pentru ca fierberea să nu înceteze, ci să aibă loc mai repede, trebuie să se pompeze neîncetat aerul din vasul cu lichid.

Dar scăderea temperaturii în timpul acestui proces are o limită: tensiunea de vapori devine în cele din urmă absolut neînsemnată și nici cele mai puternice pompe aspiratoare nu mai pot crea presiunea necesară.

Pentru a continua scăderea temperaturii, se poate ca, răcind gazul cu ajutorul lichidului obținut, să se transforme și el în lichid cu o temperatură mai joasă decît temperatura de fierbere. Acum se poate repeta operația de pompare cu a doua substanță și astfel se pot obține temperaturi mai joase. La nevoie se poate continua această metodă „în etaje" de obținere a temperaturilor joase.

Tocmai în modul acesta s-a procedat la sfîrșitul secolului trecut; lichefierea gazelor se făcea în trepte: s-a transformat succesiv în lichid etilena, oxigenul, azotul și hidrogenul, substanțe cu temperaturile de fierbere, respectiv, de —103°, —183°, —196° și —253°C. Dispunînd de hidrogen lichid, se poate obține și lichidul cu punctul de fierbere cel mai jos — heliul (—269°C). Vecinul „din stînga" a ajutat la obținerea vecinului „din dreapta".

Metoda „în etaje“ de răcire are o vechime ceva mai mică de o sută de ani. În anul 1877 s-a obținut prin această metodă aer lichid. În anii 1884—85 s-a obținut pentru prima oară hidrogen lichid. În sfîrșit, după încă 20 de ani a fost cucerită ultima redută: în anul 1908, în orașul Leyda din Olanda, Kammerling-Onnes a transformat în lichid heliul — substanța cu temperatura critică cea mai joasă. De curînd s-a aniversat jubileul de 50 de ani al acestei importante cuceriri a științei.

Timp îndelungat, laboratorul din Leyda a fost singurul laborator de temperaturi joase. Acum însă, în toate țările există zeci de astfel de laboratoare, fără a mai vorbi de fabricile care produc aer lichid pentru scopuri tehnice.

Metoda „în etaje“, de obținere a temperaturilor joase, astăzi se folosește rar. În instalațiile tehnice pentru reducerea temperaturii se aplică, în prezent, alte procedee de scădere a energiei interne a unui gaz: destinderea gazului și producerea de lucru mecanic pe seama energiei lui interne.

Dacă, de pildă, se lasă aerul comprimat la cîteva atmosfere să treacă într-o mașină de expansiune, unde efectuează un lucru mecanic de deplasare a unui piston sau de rotație a unei turbine, aerul se răcește atît de mult, încît se transformă în lichid. Dacă se dă drumul repede bioxidului de carbon dintr-o butelie, el se răcește atît de tare, încît se transformă din zbor în „gheață“.

Gazele lichide găsesc o largă întrebuințare în tehnică. Oxigenul lichid se folosește în tehnica exploziilor ca component al amestecului combustibil din motoarele-rachetă.

Lichefierea aerului se folosește în tehnică la separarea gazelor din care se compune aerul, o problemă despre care se va vorbi mai departe.

Temperatura aerului lichid este utilizată pe scară largă în diferite domenii ale tehnicii, dar pentru multe domenii ale cercetărilor fizice, această temperatură este insuficient de joasă. În adevăr, daeă se transformă gradele Celsius în grade absolute, se vede că temperatura aerului lichid este aproximativ 1/3 din temperatura camerei. Mult mai interesante pentru fizicieni sînt temperaturile „hidrogenice“, adică temperaturile de ordinul 14—20°K, și în special temperaturile „heliului“. Cea mai joasă temperatură, care se obține prin pomparea heliului lichid, este de 0,7°K.

Fizicienii au reușit să se apropie și mai mult de zero absolut. În prezent s-au obținut temperaturi care se ridică peste zero absolut doar cu cîteva miimi de grad. dar aceste temperaturi ultrajoase se obțin prin metode care nu seamănă cu cele descrise.

Vapori subrăciți și lichid supraîncălzit

Cînd temperatura vaporilor se coboară sub aceea de fierbere, vaporii trebuie să se transforme în lichid. Totuși, dacă vaporii nu vin în contact cu lichidul și dacă sînt foarte puri, se pot obține vapori subrăciți sau suprasaturați, adică vapori care ar fi urmat de mult să devină lichid.

Vaporii suprasaturați sînt foarte nestabili. Uneori este suficient să se aplice o lovitură sau să se arunce în spațiul ocupat de vapori un grăunte străin, pentru ca condensarea întîrziată să înceapă imediat.

Experiența arată că condensarea moleculelor de vapori este mult înlesnită de introducerea în vapori a unor mici particule eterogene. În aerul încărcat cu praf nu se produce suprasaturația vaporilor de apă. Condensarea se poate provoca cu ajutorul rotocoalelor de fum, căci fumul constă din părticele solide foarte mici. Pătrunzînd în vapori, aceste particule adună în jurul lor moleculele de apă și devin centre de condensare.

Așadar, deși în mod nestabil, vaporii pot exista în domeniul de temperaturi adecvat pentru „viața" unui lichid.

Dar poate, oare, un lichid să „trăiască", în aceleași condiții, în domeniul vaporilor? Cu alte cuvinte, se poate supraîncălzi un lichid?

Da, se poate. În acest scop, trebuie să se caute ca moleculele de lichid să nu se desprindă de suprafața sa. Un mijloc radical este să se suprime suprafața liberă, adică să se pună lichidul într-un gaz în care să fie comprimat din toate părțile de pereți solizi. În modul acesta se poate realiza o supraîncălzire de ordinul cîtorva grade, adică se poate deplasa punctul care reprezintă starea lichidelor spre dreapta față de curba fierberii (fig. 100).

Supraîncălzirea înseamnă deplasarea lichidului în domeniul vaporilor și de aceea supraîncălzirea unui lichid se poate face atît prin aport de căldură, cît și prin micșorarea presiunii.

Prin această ultimă metodă se poate obține un rezultat uimitor. Apa sau alt lichid din care s-au eliminat cu grijă gazele dizolvate (acest lucru nu se face ușor) se pune într-un vas cu piston care ajunge pînă la suprafața lichidului. Vasul și pistonul trebuie să fie udate de lichid. Dacă se trage pistonul în afară, apa care aderă la partea inferioară a pistonului îl urmează. Dar stratul de apă aderent la piston trage după sine stratul următor de apă, acesta trage pe cel de dedesubt și, în consecință, lichidul se întinde.

În cele din urmă, coloana de apă se rupe (și anume coloana de apă; nu se desprinde apa de piston), dar acest lucru se întîmplă

cînd forţa pe unitatea de suprafaţă atinge zeci de kilograme. Cu alte cuvinte, în lichid se produce o presiune negativă de zeci de atmosfere.

Chiar la presiuni pozitive mici este stabilă starea gazoasă, dar un lichid se poate supune şi la o presiune negativă. Un exemplu mai pregnant de „supraîncălzire" nu se poate concepe.

Topirea

Nu există corp solid care să reziste la infinit la ridicarea temperaturii. Mai curînd sau mai tîrziu, o bucăţică solidă se transformă în lichid; ce-i drept, în unele cazuri nu reuşim să atingem temperatura de topire, căci se poate produce descompunerea chimică a substanţei.

Pe măsură ce temperatura creşte, moleculele se mişcă din ce în ce mai intens. În cele din urmă, vine un moment cînd devine imposibil să se menţină ordinea între moleculele care „se agită" puternic. Atunci corpul solid se topeşte. Cea mai înaltă temperatură de topire o are wolframul: 3 380°C. Aurul se topeşte la 1 063°C, iar fierul la 1 539°C. De altfel, există şi metale uşor fuzibile. Mercurul, după cum se ştie, se topeşte la temperatura de —39°C. Substanţele organice nu au temperaturi înalte de topire. Naftalina se topeşte la 80°C, iar toluenul la —94,5°C.

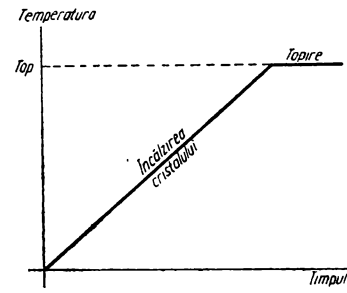


FIG. 101

Este foarte uşor de măsurat temperatura de topire a unui corp, în special dacă el se topeşte în intervalul de temperaturi care se măsoară de obicei cu termometrul. Nu este de loc obligatoriu să se urmărească cu privirea corpul care se topeşte; este suficient să se privească coloana de mercur a termometrului (fig. 101). Pînă la începerea topirii, temperatura corpului creşte. Îndată ce a început topirea, ridicarea temperaturii încetează; temperatura rămîne constantă pînă ce procesul topirii se termină complet.

Ca şi transformarea unui lichid în vapori, transformarea unui corp solid în lichid necesită căldură. Căldura necesară în acest

scop se numește căldură de topire. De exemplu, topirea unui kilogram de gheață necesită 80 kcal.

Gheața face parte dintre corpurile care au căldură mare de topire. Topirea gheței necesită, de pildă, de zece ori mai multă energie decît topirea unei mase egale de plumb. Bineînțeles că este vorba de topirea propriu-zisă; aici nu vorbim de faptul că, înainte de a începe topirea plumbului, acesta trebuie să fie încălzit la +327°C. Din cauza marii călduri de topire a gheței, se încetinește topirea zăpezii. Închipuiți-vă că ar fi de zece ori mai mică căldura de topire. Atunci inundațiile de primăvară ar produce anual nenorociri inimaginabile.

Așadar, căldura de topire a gheței este mare, dar este și mică, dacă o comparăm cu căldura de vaporizare de 540 kcal/kg (de șapte ori mai mică). De altfel, această diferență este absolut naturală. Pentru a transforma un lichid în vapori, trebuie să rupem moleculele una de alta, iar în cazul topirii, este necesar doar să stricăm ordinea de așezare a moleculelor, lăsîndu-le aproape la aceleași distanțe între ele. Se înțelege că în cazul al doilea, este nevoie de mai puțin lucru mecanic.

Existența unui anumit punct de topire este o caracteristică importantă a substanțelor cristaline. Tocmai după acest semn caracteristic ele se pot deosebi cu ușurință de celelalte corpuri solide, numite amorfe. Corpurile amorfe se întîlnesc atît printre substanțele anorganice, cît și printre cele organice. Geamurile se fac, de obicei, din silicați de sodiu și de potasiu; pe birouri se pune adesea sticlă organică (ea se mai numește și plexiglas).

Spre deosebire de cristale, substanțele amorfe nu au o anumită temperatură de topire. Sticla nu se topește, ci se înmoaie. Cînd se încălzește o bucată de sticlă, ea mai întîi devine din durd moale și se poate îndoi sau întinde; la temperaturi mai înalteă sticla începe să-și schimbe forma sub propria-i greutate. Pe mă, sură ce se încălzește, masa foarte vîscoasă de sticlă ia forma vasului în care se găsește. Această masă este la început groasă ca mierea, apoi ca smîntîna și, în sfîrșit, devine un lichid aproape tot atît de puțin vîscos ca și apa. Oricît am dori, nu putem indica în cazul de față o anumită temperatură de trecere a corpului solid în stare lichidă. Cauza este deosebirea radicală dintre structura sticlei și structura corpurilor cristaline. După cum s-a mai spus, atomii se găsesc în corpurile amorfe în dezordine. Sticla seamănă, din punct de vedere al structurii, cu un lichid. Chiar și în sticla solidă, moleculele se găsesc așezate în dezordine. Prin urmare, ridicarea temperaturii sticlei nu face decît să mărească amplitudinea oscilațiilor moleculelor sale și le dă treptat o liber-

tate de mișcare din ce în ce mai mare. De aceea, sticla se înmoaie treptat și nu prezintă trecerea bruscă de la starea solidă la cea lichidă caracteristică trecerii de la aranjamentul moleculelor în ordine strictă la așezarea lor dezordonată.

Cînd a fost vorba de curba de fierbere, am arătat că lichidul și vaporii, deși în stare nestabilă, pot exista unul în domeniul celorlalți, adică vaporii se pot subrăci și trece la stînga curbei de fierbere, iar lichidul se poate subîncălzi și retrage la dreapta acestei curbe.

Sînt, oare, posibile asemenea fenomene în relațiile dintre cristal și lichid? În acest caz, analogia nu este completă.

Dacă se încălzește un cristal, el începe să se topească la temperatura sa de topire. Un cristal nu se poate supraîncălzi. Dimpotrivă, dacă se răcește un lichid, dacă se iau anumite măsuri, se poate „rări" relativ ușor temperatura de topire [1]. La unele lichide se poate ajunge la mari subrăciri. Există chiar lichide care se pot subrăci cu ușurință, dar care cristalizează greu. Pe măsură ce se răcește un astfel de lichid, el devine din ce în ce mai vîscos și în cele din urmă se solidifică, fără a cristaliza. Acesta este cazul sticlei.

Și apa se poate subrăci. Picăturile fine de ceață pot să nu înghețe chiar la un ger puternic. Dacă într-un lichid subrăcit se aruncă un mic cristal de substanță — un agent de cristalizare — cristalizarea începe imediat.

În sfîrșit, în multe cazuri, cristalizarea care fusese întîrziată poate începe să se producă prin scuturare sau din alte cauze întîmplătoare. Se știe, de exemplu, că glicerina cristalizată s-a obținut pentru prima oară în timpul transportului pe calea ferată. După ce a stat multă vreme în repaus, sticla poate începe să se cristalizeze (să se devitrifieze, cum se spune în tehnică).

Cum se crește un cristal

Am spus că majoritatea corpurilor solide constau din cristale extrem de mici, de obicei vizibile numai la microscop. În ce privește cristalele individuale suficient de mari și avînd semnele exterioare ale cristalelor, cum sînt fețele plane, muchiile drepte și forma regulată simetrică, ele se întîlnesc destul de rar în natură. Acest lucru nu e întîmplător. În adevăr, dacă nu se iau

[1] Sau, mai exact, temperatura de solidificare, care coincide cu cea de topire.

măsuri speciale, prin răcirea unei substanțe topite se formează întotdeauna o substanță cu cristale fine, nu un cristal unic. Aceasta se explică prin faptul că creșterea cristalelor începe simultan în foarte multe puncte ale substanței topite și treptat în toată masa acesteia iau naștere un număr enorm de mici cristale.

Dacă vrem să creștem un singur cristal mare, trebuie să luăm măsuri ca acest cristal să crească dintr-un singur punct. Dacă deja au început să crească mai multe cristale, în orice caz trebuie să se ia măsuri ca condițiile de creștere să fie favorabile numai pentru unul din ele.

Iată, de pildă, cum se procedează la creșterea cristalelor de metale ușor fuzibile. Se topește metalul într-o eprubetă de sticlă cu un capăt prelungit. Această eprubetă, suspendată de un fir în interiorul unui cuptor cilindric vertical, se lasă încet în jos. Capătul prelungit al eprubetei iese treptat din cuptor și se răcește. Începe cristalizarea. Mai întîi se formează mai multe cristale mici, dar acelea care cresc pe lături se lovesc de peretele eprubetei și creșterea lor este încetinită. În condiții favorabile se găsește numai acel cristal mic care crește de-a lungul axei eprubetei, adică în mijlocul substanței topite. Pe măsură ce eprubeta se coboară, alte porțiuni ale substanței topite, care ajung în zona temperaturilor joase, vor „alimenta" acest cristal unic. De aceea, dintre toate cristalele mici supraviețuiește unul singur; pe măsură ce eprubeta se coboară, el continuă să crească de-a lungul axei acesteia. În cele din urmă, tot metalul topit se solidifică sub forma unui cristal unic.

Aceeași idee stă la baza creșterii cristalelor greu fuzibile de rubin. Praful fin de substanță se lasă să treacă sub formă de jet printr-o flacără. Atunci granulele fine de praf se topesc, iar picăturile foarte mici cad pe un postament greu fuzibil cu suprafață foarte mică și formează o mulțime de mici cristale. Picăturile continuînd să cadă pe postament, toate cristalele cresc, dar și de data aceasta va crește complet numai acela care se găsește în poziția cea mai favorabilă pentru „primirea" picăturilor care cad. De foarte multe ori cristalele cresc din soluții. Despre această cristalizare vom vorbi ceva mai departe.

La ce sînt necesare cristalele mari?

Cristalele individuale mari sînt adesea necesare în industrie și știință. Mare importanță pentru tehnică au cristalele de sare Seignette și de cuarț, care au proprietatea remarcabilă de a transforma acțiunile mecanice (de exemplu, presiunea) în tensiune electrică.

Industria optică are nevoie de cristale mari de calcit, de sare gemă, de fluorit etc.

Pentru industria ceasurilor sînt necesare cristalele de rubin, de safir și de alte cîteva pietre prețioase. În adevăr, unele piese în mișcare ale ceasurilor obișnuite fac pînă la 20 000 de oscilații pe oră. O viteză atît de mare impune condiții neobișnuit de grele calității fuselor și lagărelor. Uzura va fi minimă cînd ca lagăr pentru fusul cu diametrul de 0,07—0,15 mm al unui ax se va folosi un rubin sau safir. Cristalele artificiale ale acestor substanțe sînt foarte dure și se uzează foarte puțin prin frecarea cu oțelul. Este interesant că pietrele artificiale sînt, în această privință, mai bune decît pietrele naturale respective.

Pentru studiul proprietăților metalelor este important să se dispună de cristale individuale mari de fier, cupru etc.

Influența presiunii asupra temperaturii de topire

Dacă presiunea variază, variază și temperatura de topire. Ne-am mai întîlnit cu o asemenea lege atunci cînd am vorbit despre fierbere. Cu cît presiunea este mai mare, cu atît temperatura de fierbere este mai ridicată. De regulă, aceasta e adevărat și pentru topire. Există însă un mic număr de substanțe care se comportă anormal: temperatura lor de topire scade cînd presiunea se mărește.

În adevăr, majoritatea covîrșitoare a corpurilor solide sînt mai dense decît lichidele respective. Fac excepție de la această regulă tocmai acele substanțe a căror temperatură de topire variază în mod nu tocmai obișnuit cînd presiunea variază — de exemplu, apa. Gheața este mai ușoară decît apa, iar temperatura de topire a gheței scade cînd presiunea crește.

Compresiunea contribuie la formarea unei stări mai dense. Dacă un corp solid este mai dens decît același corp în stare lichidă, compresiunea ajută solidificarea și împiedică topirea. Dar dacă topirea este îngreuiată de compresiune, înseamnă că substanța rămîne solidă, deși mai înainte ea s-ar fi topit la această temperatură, adică dacă presiunea se mărește, temperatura de topire crește. Într-un caz anormal, lichidul este mai dens decît corpul solid respectiv și presiunea favorizează formarea lichidului, adică face să scadă temperatura de topire.

Influența presiunii asupra temperaturii de topire este mult mai mică decît efectul similar în cazul fierberii. Mărirea presiunii

cu mai mult de 100 kgf/cm² face să scadă temperatura de topire a gheței cu 1°C.

De aici, în treacăt fie zis, se vede că este naivă explicația adesea întîlnită a alunecării patinelor pe gheață prin scăderea temperaturii de topire din cauza presiunii. Presiunea pe lama patinei nu depășește în nici un caz 100 kgf/cm², iar scăderea temperaturii de topire din această cauză nu poate juca nici un rol pentru patinatori.

Evaporarea corpurilor solide

Cînd se spune că o substanță se evaporă, se subînțelege de obicei că e vorba de un lichid. Dar și corpurile solide se pot evapora. Evaporarea corpurilor solide se numește sublimare.

Un corp solid care se evaporă este, de exemplu, naftalina. Naftalina se topește la 80°C, dar se evaporă la temperatura camerei. Tocmai această proprietate a naftalinei permite folosirea ei la distrugerea moliilor. O șubă de blană presărată cu naftalină se îmbibă cu vapori de naftalină și creează o atmosferă pe care moliile nu o suportă. Orice substanță solidă mirositoare sublimează într-o măsură însemnată. Mirosul este produs de moleculele care se smulg din substanță și ajung la nasul nostru. Dar mai dese sînt cazurile cînd substanța sublimează în măsură neînsemnată, uneori în așa măsură, încît nu poate fi detectată nici prin cercetări foarte atente. În principiu, orice substanță solidă (chiar fierul sau cuprul) se evaporă. Dacă nu constatăm sublimarea ei, aceasta înseamnă doar că densitatea vaporilor saturanți este infimă.

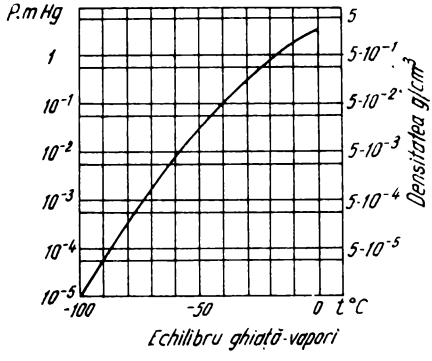


FIG. 102

Densitatea vaporilor saturați care se găsesc în echilibru cu corpul solid crește repede cu creșterea temperaturii (fig. 102). Ne putem convinge că o serie de substanțe care nu au miros înțepător la temperatura camerei îl pierd la temperaturi mai scăzute.

În majoritatea cazurilor, nu se poate mări densitatea vaporilor saturați ai unui corp solid pentru simplul motiv că substanța se topește mai curînd.

Se evaporă și gheața. Gospodinele știu bine acest lucru cînd atîrnă pe frînghie rufele ude afară cînd este ger. Apa mai întîi îngheață și gheața se evaporă, iar rufele se usucă.

Punctul triplu

Așadar, există condiții în care vaporii, lichidul și cristalul pot exista două cîte două în echilibru.

Se pot găsi în echilibru toate stările? Un astfel de punct există pe diagrama presiune-temperatură și se numește punct triplu. Unde se găsește el?

Dacă într-un vas închis, se pune, la zero grade, apă cu gheață plutind în ea, în spațiul liber din vas încep să pătrundă vaperi de apă (și de gheață). La presiunea de 4,6 mm Hg, evaporarea încetează și începe saturarea. Acum cele trei faze — gheață, apă și vapori — se găsesc în stare de echilibru. Acesta este tocmai punctul triplu.

Relațiile dintre diferitele stări sînt arătate în mod sugestiv și clar de diagrama apei reprezentată în fig. 103.

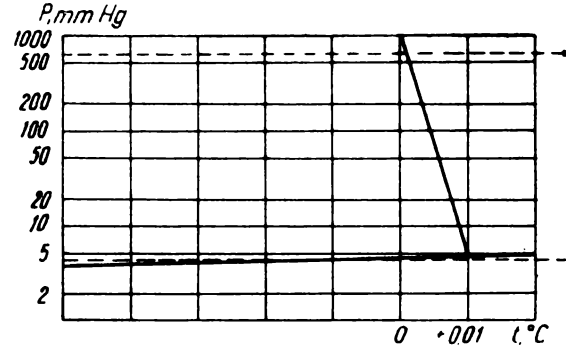


FIG. 103

O astfel de diagramă se poate construi pentru orice corp.

Curbele din această figură ne sînt cunoscute — sînt curbele de echilibru dintre gheață și vapori, dintre gheață și apă și dintre apă și vapori. Pe verticală, ca de obicei, se ia presiunea, iar pe orizontală se ia temperatura.

Cele trei curbe se intersectează în punctul triplu și împart diagrama în trei regiuni, care reprezintă respectiv domeniul gheței, al apei și al vaporilor de apă.

Diagrama de stare este un fel de îndrumător condensat. Scopul ei este să dea răspuns la întrebarea: ce stare a unui corp este stabilă la cutare presiune și cutare temperatură.

Dacă se pune apă sau vapori în condițiile „domeniului din stînga", ele devin gheață. Dacă se introduce un lichid sau un corp solid în „domeniul de jos", se obțin vapori. În „domeniul din dreapta", vaporii se vor condensa, iar gheața se va topi.

Diagrama existenței fazelor permite să se spună imediat ce se va întîmpla cu o substanță cînd este încălzită sau comprimată. Încălzirea sub presiune constantă este reprezentată pe diagramă printr-o linie orizontală. De-a lungul acestei linii se deplasează de la stînga spre dreapta punctul care reprezintă starea corpului.

În figură sînt reprezentate două astfel de linii, dintre care una este încălzirea sub presiune normală. Această linie este situată deasupra punctului triplu. De aceea ea intersectează mai întîi curba de topire și apoi, dincolo de limitele desenului, și curba de evaporare. Gheața sub presiune normală se topește la temperatura de 0°C, iar apa care se formează din ea începe să fiarbă la 100°C.

Altfel se petrec lucrurile cu gheața care se încălzește sub presiune foarte redusă, să zicem, ceva mai mică de 5 mm Hg.

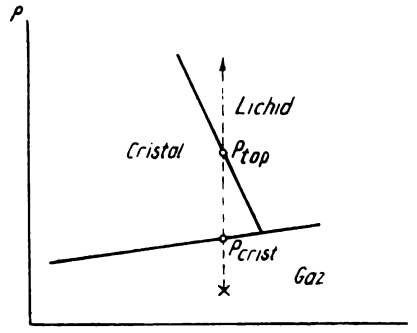


FIG. 104

Procesul de încălzire este reprezentat de linia care trece pe sub punctul triplu. Curbele topirii și fierberii nu sînt intersectate de această linie. La această presiune neînsemnată, încălzirea are ca efect transformarea directă a gheței în vapori.

În fig. 104, aceeași diagramă arată ce fenomen interesant are loc cînd se comprimă vaporii de apă în starea marcată pe figură cu o cruciuliță. Mai întîi, vaporii se transformă în gheață, care apoi se topește. Figura permite să se spună imediat la ce presiune va începe creșterea cristalului și cînd se va produce topirea.

Diagramele de stare ale tuturor substanțelor sînt asemănătoare una cu alta. Diferențe mari, din punctul de vedere al vieții de toate zilele, apar din cauză că locul unde se găsește punctul triplu poate fi foarte diferit la diferitele substanțe.

În adevăr, existența noastră se desfășoară în apropiere de „condițiile normale", adică, în primul rînd, la o presiune apropiată de o atmosferă. Prin urmare, pentru noi este esențială poziția punctului triplu al unei substanțe în raport cu linia presiunii normale.

Dacă presiunea în punctul triplu este mai mică decît cea atmosferică, pentru noi, care trăim în condiții „normale", subs anța face parte dintre cele care se topesc. Cînd temperatura se ridică, ea se transformă în lichid și apoi începe să fiarbă. În cazul contrar — cînd presiunea în punctul triplu este mai mare decît cea atmosferică — în timpul încălzirii nu vedem lichid, căci corpul solid se transformă direct în vapori. Așa se comportă „gheața carbonică", ceea ce este comod pentru vînzătorii de înghețată. Bucățile de înghețată pot fi ambalate în bucăți de „gheață carbonică" fără pericol de umezire a înghețatei. Punctul triplu al acestei substanțe este situat la 73 atm. De aceea, cînd se încălzește CO_2 solid, punctul care reprezintă starea sa se deplasează pe o orizontală care intersectează numai curba vaporizării corpului solid (ca și la gheața obișnuită, la o presiune de circa 5 mm Hg).

Aceiași atomi, dar diferite cristale

Grafitul negru, mat și moale cu care scriem și diamantul sclipitor, transparent, dur, care taie sticla, sînt făcuți din aceiași atomi — atomi de carbon. De ce sînt atît de diferite proprietățile acestor două substanțe cu compoziție identică?

Amintiți-vă rețeaua grafitului stratificat, la care fiecare atom are trei vecini foarte apropiați, și rețeaua diamantului, ai cărui atomi au cîte patru vecini apropiați. Din acest exemplu se vede clar cum proprietățile cristalelor sînt determinate de poziția reciprocă a atomilor. Din grafit se fac creuzete refractare, care rezistă la temperaturi de două-trei mii de grade, dar diamantul arde la temperaturi de peste 700°; greutatea specifică a diamantului este 3,5, iar a grafitului este 2,3; grafitul este bun conducător de electricitate, iar diamantul nu, și așa mai departe.

Nu numai carbonul are această proprietate de a cristaliza în diferite forme. Aproape fiecare element chimic, și nu numai ele-

mentele, ci și orice substanță chimică, poate exista în mai multe varietăți. Se cunosc șase varietăți de gheață, nouă varietăți de sulf, patru varietăți de fier.

Cînd am analizat diagrama de stare, n-am vorbit despre diferitele tipuri de cristale; am descris doar o singură regiune a corpului solid. Dar această regiune se împarte, la foarte multe substanțe, în porțiuni, dintre care fiecare corespunde la un anumit „sort" de corp solid sau, cum se spune, la o anumită fază solidă (o anumită modificație cristalină).

Fiecare fază cristalină are regiunea sa de stare stabilă, mărginită de un anumit interval de presiuni și de temperaturi. Legile transformării unei varietăți cristaline în alta sînt aceleași ca legile topirii și ale evaporării.

Pentru fiecare presiune se poate indica temperatura la care ambele tipuri de cristale coexistă pașnic. Dacă se ridică temperatura, un cristal de un fel se va transforma într-un cristal de al doilea fel. Dacă se scade temperatura, se va produce transformarea inversă.

Pentru ca la presiunea normală sulful roșu să se transforme în sulf galben, este nevoie de o temperatură mai mică de 110°C. Deasupra acestei temperaturi, pînă la punctul de topire, este stabilă ordinea de aranjare a atomilor proprie sulfului roșu. Dacă temperatura scade, oscilațiile atomilor se micșorează și, începînd de la 110°C în jos, natura găsește o ordine mai comodă de aranjare a atomilor, astfel că se produce transformarea unui cristal într-altul.

Nimeni nu s-a gîndit să dea cîte un nume celor șase feluri deosebite de gheață. De aceea se spune: gheață unu, gheață doi, ..., gheață șapte. Dar, de ce gheață șapte, dacă există numai șase varietăți? Pentru că gheața patru nu a fost găsită, cu toate experiențele repetate care s-au făcut.

Dacă se comprimă apa la o temperatură apropiată de zero grade, la o presiune de circa 2 000 atm se formează gheață cinci, iar la o presiune de circa 6 000 atm, gheață șase.

Gheață doi și gheață trei sînt stabile la temperaturi sub zero grade.

Gheața șapte este gheață fierbinte; ea apare cînd se comprimă apa fierbinte la o presiune de circa 2 000 atm.

Toate felurile de gheață, afară de gheața obișnuită, sînt mai grele decît apa. Gheața care se obține în condiții exterioare normale se comportă în mod anormal; invers, gheața obținută în condiții diferite de cele normale se comportă normal.

Am spus că fiecărei modificații cristaline îi e proprie o anumită regiune de existență. Dar dacă e așa, în ce mod există în aceleași condiții grafitul și diamantul?

O atare „ilegalitate" se întîlnește foarte des în lumea cristalelor. Aproape, de regulă, cristalele știu să existe în condiții „străine". Dacă pentru transferul vaporilor sau al unui lichid în regiuni străine de existență este necesar să se recurgă la diferite artificii, dimpotrivă, aproape niciodată nu se poate sili un cristal să rămînă în limitele pe care i le-a trasat natura.

Supraîncălzirea și subrăcirea cristalelor se explică prin dificultatea de a transforma o ordine în alta în condițiile de înghesuială extremă în care se găsesc atomii. Sulful galben trebuie să se transforme în sulf roșu la 95,5°C. Printr-o încălzire mai mult sau mai puțin rapidă, „sărim" peste acest punct de transformare și ridicăm temperatura de topire a sulfului la 113°C.

Temperatura reală de transformare se poate afla în modul cel mai simplu prin punerea în contact a cristalelor. Dacă ele se pun strîns unul peste altul și dacă se menține o temperatură de 96°C, sulful galben va fi mîncat de cel roșu, iar la 95°C, sulful galben va înghiți pe cel roșu. Spre deosebire de transformarea „cristal-lichid", transformarea „cristal-cristal" este întîrziată de obicei atît prin subrăcire, cît și prin supraîncălzire.

În unele cazuri avem de-a face cu stări ale substanței care s-ar presupune că există la cu totul alte temperaturi.

Cositorul alb trebuie să se transforme în cositor cenușiu cînd temperatura scade la + 13°C. De obicei avem de-a face cu cositor alb și știm că iarna nu faci nimic cu el. El suportă perfect subrăciri de 20—30°, dar cînd iarna este aspră, cositorul alb se transformă în cositor cenușiu. Necunoașterea acestui fapt a fost una din cauzele care au dus la eșecul expediției lui Scott la Polul Sud (în anul 1912). Combustibilul lichid al expediției se găsea în vase lipite cu cositor. În timpul gerurilor mari, cositorul alb s-a transformat în cositor cenușiu, vasele s-au dezlipit, iar combustibilul s-a scurs din ele. Nu degeaba petele cenușii de pe cositorul alb se numesc ciuma cositorului.

Ca și în cazul sulfului, cositorul alb poate fi transformat în cositor cenușiu la o temperatură ceva mai joasă de 13°C, îndată ce un obiect de cositor vine în contact cu un grăunte cît de mic de cositor cenușiu.

Existența mai multor varietăți ale aceleiași substanțe și întîrzierea transformărilor lor reciproce au o importanță enormă pentru tehnică.

La temperatura camerei, atomii de fier formează o rețea cubică cu volum centrat, în care atomii ocupă locurile din vîrfurile și din centrul cubului. Fiecare atom are 8 vecini. La temperaturi înalte, atomii de fier formează un „aranjament" mai îndesat, fiecare atom avînd 12 vecini. Fierul cu 8 vecini este moale, iar fierul cu 12 vecini este dur. Se poate obține fier de al doilea tip la temperatura camerei. Această metodă — călirea — se aplică pe scară largă în metalurgie.

Călirea se face foarte simplu: se încălzește obiectul de metal la roșu și apoi se aruncă în apă sau în ulei. Răcirea are loc atît de repede, încît transformarea structurii, care este stabilă la temperaturi înalte, nu are timp să se producă. În modul acesta, structura proprie temperaturii înalte va exista un timp nelimitat în condiții improprii pentru ea: recristalizarea în structura stabilă se desfășoară atît de încet, încît este practic insesizabilă.

Vorbind despre călirea fierului n-am fost pe deplin exacți. Se călește oțelul, adică fierul care conține un procent de 1% carbon. Prezența unor adaosuri cît de mici de carbon întîrzie transformarea fierului dur în fier moale și permite să se facă călirea. În ce privește fierul absolut pur, el nu se poate căli, căci transformarea structurii se produce chiar în cazul răcirii oricît de bruște.

În funcție de forma diagramei de stare, variindu-se presiunea sau temperatura, se obțin diferite transformări.

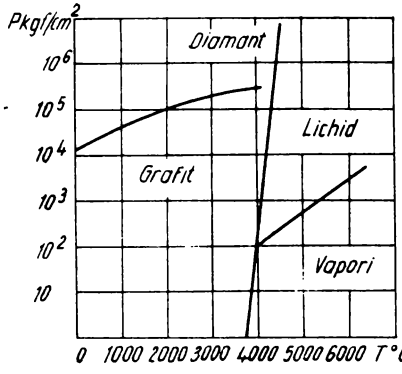


FIG. 105

Multe transformări ale unui cristal în alt cristal se observă cînd variază doar presiunea. Prin această metodă s-a obținut fosforul negru.

S-a reușit să se transforme grafitul în diamant numai folosindu-se în același timp atît o temperatură înaltă, cît și o presiune mare. În fig. 105 este reprodusă diagrama de stare a carbonului. La presiuni mai mici de 10 000 atm și la temperaturi mai mici de 4 000°K, modificația stabilă este grafitul. Așadar, diamantul există în condiții „străine" și de aceea se poate transforma fără dificultate în grafit. Dar un interes practic prezintă problema inversă. Numai prin ridicarea presiunii nu se poate realiza trans-

formarea grafitului în diamant. Transformarea de fază în stare solidă are loc, după cît se pare, extraordinar de încet. Forma diagramei de stare sugerează soluția justă: mărirea presiunii și, simultan, încălzirea. Atunci vom obține (colțul din dreapta al diagramei) carbon topit. Răcindu-l la presiune înaltă, trebuie să cădem în regiunea diamantului.

Posibilitatea practică a unui asemenea proces a fost dovedită în anul 1955, iar în momentul de față, problema este considerată tehnic rezolvată.

Un lichid uimitor

Dacă se scade temperatura unui corp, mai curînd sau mai tîrziu el se solidifică și capătă o structură cristalină. În acest caz este indiferent la ce presiune se produce răcirea. Acest lucru pare absolut natural și inteligibil din punctul de vedere al legilor fizicii, cu care am făcut cunoștință pînă acum. În adevăr, scăzînd temperatura, micșorăm intensitatea mișcării termice. Cînd mișcarea moleculelor devine atît de slabă încît încetează să mai stingherească forțele de interacțiune dintre ele, moleculele se aranjează în ordine perfectă și formează un cristal. Răcirea mai departe răpește moleculelor toată energia lor de mișcare, iar la zero absolut substanța trebuie să existe sub formă de molecule în repaus, aranjate într-o rețea regulată.

Experiența arată că în modul acesta se comportă toate substanțele. Toate, afară de una singură: acest „monstru" este heliul.

Am dat deja cititorului cîteva informații despre heliu. Heliul bate recordul în ce privește valoarea temperaturii critice. Nici o substanță nu are temperatura critică mai joasă de 4,3°K. Dar acest record nu înseamnă în sine nimic surprinzător. Uimitor este altceva: răcind heliul sub temperatura critică, practic pînă la zero absolut, nu obținem heliu solid. Heliul rămîne lichid chiar la zero absolut.

Comportarea heliului este cu totul inexplicabilă din punctul de vedere al legilor mișcării și este unul din semnele valabilității limitate a unor legi ale naturii care păreau universal valabile.

Dacă un corp este lichid, înseamnă că atomii lui se găsesc în mișcare. Dar răcind corpul la zero absolut, i-am luat toată energia

de mișcare. Trebuie însă să recunoaștem că heliul are o oarecare energie de mișcare care nu poate fi înlăturată. Această concluzie este incompatibilă cu mecanica cu care ne-am ocupat pînă acum. Conform acestei mecanici studiate de noi, mișcarea unui corp se poate frîna întotdeauna pînă la oprirea completă, înlăturîndu-i energia cinetică; tot așa se poate opri mișcarea moleculelor, făcîndu-le să-și piardă energia prin ciocnirea cu pereții vasului supus răcirii. La heliu însă această mecanică nu este valabilă.

Comportarea „ciudată" a heliului este o indicație asupra unui fapt de importanță enormă. Este prima oară cînd întîlnim imposibilitatea de a aplica în lumea atomilor legile mecanicii stabilite prin studiul direct al mișcării corpurilor vizibile — legi care păreau că sînt temelia de neclintit a fizicii.

Faptul că la zero absolut heliul „refuză" să cristalizeze nu se poate în nici un fel împăca cu mecanica pe care am studiat-o pînă acum. Contradicția de care ne-am lovit acum pentru prima oară — faptul că lumea atomilor nu ascultă de legile mecanicii — este doar prima verigă din lanțul de contradicții și mai ascuțite și categorice din fizică.

Aceste contradicții impun necesitatea de a se revizui bazele mecanicii lumii atomilor. Această revizuire este foarte profundă și conduce la modificarea întregii noastre concepții despre natură.

Necesitatea revizuirii radicale a mecanicii lumii atomilor nu înseamnă că trebuie să punem cruce legilor mecanicii studiate de noi. Ar fi absurd să obligăm pe cititor să studieze lucruri inutile. Mecanica veche este perfect valabilă în lumea corpurilor mari. Chiar numai acest lucru este suficient ca să se acorde tot respectul cuvenit capitolelor respective ale fizicii. Dar este important și faptul că o serie de legi ale mecanicii „vechi" se aplică fără nici o modificare și în „noua" mecanică. Dintre ele face parte, în particular, legea conservării energiei.

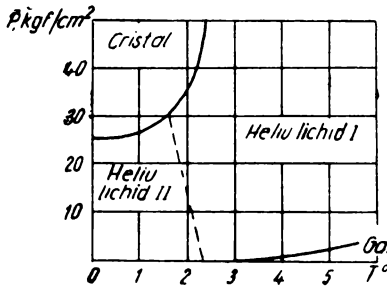


FIG. 106

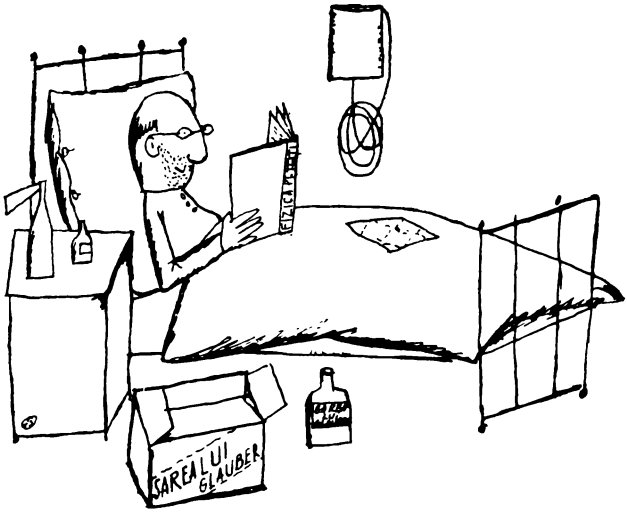
Existența unei energii „inalienabile" la zero absolut nu este o proprietate exclusivă a heliului. Energie „de zero" au toate substanțele, numai că la heliu această energie este suficientă pentru a împiedica atomii să formeze o rețea cristalină regulată.

Să nu se creadă că heliul nu se poate găsi în stare cristalină. Pentru cristalizarea heliului este suficient să se mărească presiunea la 25 atm. Răcirea efectuată la o presiune superioară acesteia are ca rezultat formarea de heliu solid cristalizat, cu proprietăți absolut obișnuite. Heliul formează o rețea cubică cu fețe centrate.

În fig. 106 este reprezentată diagrama de stare a heliului. Ea diferă foarte mult de diagramele tuturor celorlalte substanțe prin lipsa punctului triplu. Curbele topirii și fierberii nu se intersectează.

XIII

Soluțiile



Ce este o soluție

Dacă se pune sare în supă și se amestecă cu lingura, nu rămîne nici urmă de sare. Să nu se creadă că grăunțele de sare pur și simplu nu se văd cu ochiul liber, dar există încă în supă. Nu se pot descoperi cu nici un chip cristale oricît de mici de sare, pentru motivul că s-au dizolvat. Dacă se pune în supă piper, nu se obține o soluție. Se poate amesteca supa zile întregi, dar micile grăunțe negre de piper nu vor dispărea.

Ce înseamnă însă că o „substanță s-a dizolvat"? Nu cumva atomii sau moleculele din care este formată pot dispărea fără urmă? Firește că nu dispar. Prin dizolvare dispare numai grăuntele de substanță, micul cristal, care este o îngrămădire de molecule de același fel. Dizolvarea constă dintr-o amestecare a particulelor unui amestec în care moleculele unei substanțe se împrăștie printre moleculele alteia. O soluție este un amestec de molecule sau de atomi de substanțe diferite.

O soluție poate conține diferite cantități de substanță dizolvată. Compoziția unei soluții se caracterizează prin concentrația sa, de exemplu, prin raportul dintre numărul de grame de substanță dizolvată și numărul de litri de soluție.

Pe măsură ce se adaugă substanță solubilă, concentrația soluției crește, dar nu nelimitat. Mai curînd sau mai tîrziu, soluția devine saturată și încetează să „primească" substanța solubilă.

Concentrația unei soluții saturate, adică concentrația „maximă" a soluției se numește solubilitate.

Uimitor de mult zahăr se poate dizolva în apă fierbinte. La temperatura de 80°C, un pahar plin cu apă primește nici mai mult nici mai puțin de 720 g de zahăr. Această soluție saturată este groasă și vîscoasă; bucătarii o numesc sirop de zahăr. Valoarea pe care am dat-o pentru zahăr se referă la un pahar de apă cu capacitatea de 0,2 l. Așadar, concentrația zahărului în apă la 80°C este egală cu 3 600 g/l (se citește: „grame la litru").

Solubilitatea unor substanțe depinde foarte mult de temperatură. La temperatura camerei (20°C), solubilitatea zahărului în apă scade la 2 000 g/l. Dimpotrivă, solubilitatea sării variază într-o măsură absolut neînsemnată cînd temperatura variază.

Zahărul și sarea se dizolvă bine, pe cînd naftalina este practic insolubilă în apă. Diferitele substanțe se dizolvă în mod cu totul diferit în diferiți solvenți.

Soluțiile se folosesc la creșterea monocristalelor. Dacă se suspendă într-o soluție saturată un mic cristal din substanța din care este făcută soluția, pe măsură ce solventul se evaporă, substanța dizolvată se depune pe suprafața acestui mic cristal. În acest caz, moleculele vor respecta o ordine riguroasă și, în consecință, micul cristal se va transforma într-unul mare, rămînînd totuși un monocristal.

Soluțiile de lichide și gaze

Se poate dizolva un lichid în alt lichid? Bineînțeles că se poate. De exemplu, votca este o soluție de alcool în apă (sau, dacă vreți, de apă în alcool, după cum este mai multă apă sau mai mult alcool). Votca este o soluție adevărată, căci moleculele de apă și de alcool sînt amestecate complet în ea.

Dar nu întotdeauna cînd se amestecă două lichide se obține acest rezultat. Încercați să turnați în apă petrol lampant. Prin nici un fel de amestecare nu se poate obține o soluție omogenă; este tot așa de imposibil ca a dizolva piper în supă. Îndată ce se întrerupe amestecarea, lichidul se așază în straturi: de exemplu, apa, mai grea, jos, iar petrolul, mai ușor, deasupra. Petrolul cu apa și alcoolul cu apa sînt sisteme opuse în ce privește proprietatea solubilității.

Există însă și cazuri intermediare. Dacă se amestecă eter cu apă, vedem clar în vas două straturi. La prima vedere, se poate părea că deasupra stă eterul, iar jos apa. De fapt, atît stratul inferior cît și cel superior sînt soluții: jos apă în care s-a dizolvat

o parte din eter (concentrație 25 g eter la litrul de apă), iar sus eter în care se găsește o cantitate sensibilă de apă (60 g/l).

Acum ne vom ocupa de soluțiile de gaze. E clar că toate gazele se dizolvă unul într-altul în cantități nelimitate. Două gaze se amestecă întotdeauna în așa fel, încît moleculele unuia pătrund printre moleculele celuilalt, căci moleculele gazelor interacționează slab una cu alta și fiecare gaz se comportă în prezența altui gaz ca și cum n-ar da nici o „atenție" tovarășului său de viață.

Gazele se pot dizolva și în lichide, dar nu în orice cantitate, ci în cantități limitate, nedeosebindu-se în această privință de substanțele solide. Pe de altă parte, gazele se dizolvă în mod diferit și diferențele pot fi foarte mari. În apă se poate dizolva o cantitate enormă de amoniac (la o jumătate de pahar de apă rece, circa 100 g), mari cantități de hidrogen sulfurat și de bioxid de carbon. În cantitate neînsemnată este solubil în apă oxigenul și azotul (0,07 și 0,03 g la litrul de apă rece). Așadar, într-un litru de apă rece se găsește doar circa o zecime de gram de aer. Totuși chiar această cantitate atît de mică joacă un mare rol în viața de pe Pămînt, căci peștii respiră oxigenul provenit din aer și dizolvat în apă.

Cu cît presiunea unui gaz este mai mare, cu atît el se dizolvă într-o cantitate mai mare în lichid. Dacă cantitatea de gaz dizolvat nu este prea mare, între ea și presiunea gazului de deasupra suprafeței lichidului există o proporționalitate directă.

Cine n-a simțit plăcere bînd sifon, care potolește atît de bine setea! Sifonul se poate obține datorită faptului că cantitatea de gaz dizolvat depinde de presiune. Bioxidul de carbon se introduce în apă sub presiune (din buteliile care se găsesc la fiecare chioșc unde se vinde sifon). Cînd se toarnă sifon în pahar, presiunea lui scade la cea atmosferică și din apă se degajă „surplusul" de gaz sub formă de bășicuțe.

Avînd în vedere aceste efecte, nu trebuie niciodată să se ridice scafandrii repede din apă la suprafață. Sub presiunea mare de la adîncime, în sîngele scafandrului se dizolvă o cantitate suplimentară de gaz. În timpul ridicării, presiunea scade, aerul începe să se degaje sub formă de bule și poate astupa vasele sanguine,

Soluții solide

În viața de toate zilele, cuvîntul „soluție" se aplică lichidelor, dar există și amestecuri solide, ai căror atomi și molecule s-au amestecat omogen. Dar cum se pot obține soluțiile solide? Cu

ajutorul mojarului și pistilului nu le veți obține niciodată. De aceea, trebuie mai întîi să se transforme în lichid substanțele ce urmează a se amesteca, adică să se topească, apoi să se amestece și să se lase să se solidifice. Se poate proceda și altfel: să dizolvăm într-un lichid oarecare cele două substanțe pe care dorim să le amestecăm și apoi să evaporăm solventul. Prin aceste procedee se pot obține soluții solide. Se pot obține, dar de obicei nu se obțin. Soluțiile solide sînt o raritate. Dacă în apă sărată se aruncă o bucată de zahăr, ea se dizolvă perfect. Să evaporăm apa; pe fundul vasului se observă cristale extrem de mici de sare și de zahăr. Sarea și cu zahărul nu dau soluții solide.

Se poate topi în același creuzet cadmiu și bismut. După răcire, vom vedea la microscop un amestec de cristale de cadmiu și de bismut. Nici bismutul și cadmiul nu formează soluții solide.

O condiție necesară, dar nu și suficientă, de formare a soluțiilor solide este asemănarea cît mai mare a moleculelor sau atomilor substanțelor care se amestecă, atît ca formă cît și ca dimensiuni. În acest caz, cînd amestecul se solidifică, se formează un singur fel de cristale mici. Colțurile rețelei fiecărui cristal sînt ocupate de obicei de atomi (sau molecule) de feluri diferite, fără nici o ordine anumită.

Aliajele de metale, care au mare importanță tehnică, reprezintă adesea niște soluții solide. Prin dizolvarea unei mici cantități dintr-un corp străin se pot modifica radical proprietățile metalului. O ilustrație strălucită în acest sens este obținerea unuia din materialele cele mai întrebuințate în tehnică — oțelul, care reprezintă o soluție solidă de cantități mici de carbon aproximativ 0,5% în greutate (un atom de carbon la 40 de atomi de fier) — în fier, atomii de carbon pătrunzînd fără nici o ordine printre atomii de fier.

În fier se dizolvă numai un număr redus de atomi de carbon, dar unele soluții solide se formează prin amestecarea substanțelor în orice proporții. Ca exemplu poate servi aliajul de aur cu cupru. Cristalele de aur și cele de cupru au rețeaua de același tip — cubic cu fețe centrate. Același fel de rețea are și aliajul de cupru cu aur. Vom căpăta o idee despre structura aliajului cu o proporție de cupru din ce în ce mai mare, dacă vom presupune că putem îndepărta din rețea atomii de aur și-i vom înlocui cu atomi de cupru. Această înlocuire se produce fără nici o deosebire, atomii de cupru distribuindu-se în general la întîmplare la colțurile rețelei. Aliajele de cupru cu aur se pot numi soluții de substituire, iar oțelul este o soluție de alt tip — soluție de penetrație.

În majoritatea covîrșitoare a cazurilor însă, nu se produc soluții solide și, cum s-a mai spus, după răcire putem vedea la microscop că substanța rezultantă constă dintr-un amestec de mici cristale din cele două substanțe componente.

Cum îngheață soluțiile

Dacă se răcește o soluție a unei sări oarecare în apă, se constată că temperatura de congelare a scăzut. S-a trecut sub zero grade, dar nu se produce încă solidificarea. De-abia la o temperatură de cîteva grade sub zero apar mici cristale în lichid. Acestea sînt cristale de gheață pură, căci sarea nu se dizolvă în gheață solidă.

Temperatura de congelare depinde de concentrația soluției. Mărind concentrația soluției, vom reduce temperatura de cristalizare. Temperatura de congelare cea mai joasă o are soluția saturată. Scăderea temperaturii de congelare a soluției nu e de loc mică: astfel, soluția saturată de sare de bucătărie în apă îngheață la —21°C. Cu ajutorul altor săruri se poate obține o scădere și mai mare a temperaturii; clorura de calciu, de exemplu, permite să se coboare temperatura de congelare a soluției pînă la — 55°C.

Să examinăm acum cum se desfășoară procesul congelării. După ce se precipită din soluție primele cristale mici de gheață, concentrația soluției se mărește. Acum numărul relativ de molecule străine crește, obstacolele în calea procesului de cristalizare a apei de asemenea se măresc, iar temperatura de congelare scade. Dacă nu se coboară temperatura mai departe, cristalizarea se oprește. Continuînd a scădea temperatura, cristalele de apă (de solvent) continuă să se precipite din soluție. În sfîrșit, soluția devine saturată. Îmbogățirea mai departe a soluției în substanța dizolvată devine imposibilă și soluția se solidifică instantaneu, iar dacă se examinează la microscop amestecul congelat, se poate vedea că el constă din mici cristale de gheață și mici cristale de sare.

Așadar, o soluție nu îngheață ca un lichid simplu. Procesul de congelare se întinde pe un interval mare de temperaturi.

Ce se întîmplă dacă se presară cu sare o suprafață congelată oarecare? Răspunsul la această întrebare este binecunoscut: îndată ce sarea vine în contact cu gheața, aceasta începe să se topească. Pentru ca să se producă acest fenomen, firește, este necesar ca temperatura de congelare a soluției de sare să fie inferioară temperaturii aerului. Dacă această condiție este îndeplinită, amestecul

de gheață cu sare se găsește într-o regiune de stare străină, și anume în regiunea de existență stabilă a soluției. De aceea, amestecul de gheață cu sare se va transforma în soluție, adică gheața se va topi, iar sarea se va dizolva în apa formată din topire. În cele din urmă, sau toată gheața se topește, sau se formează un amestec cu o astfel de concentrație încît temperatura sa de congelare este egală cu temperatura mediului.

Suprafața unei curți de 100 m^2 este acoperită cu un strat de gheață gros de 1 cm, ceea ce înseamnă o cantitate nu prea mică de gheață — circa o tonă. Să calculăm cîtă sare este necesară pentru curățirea curții, dacă temperatura aerului este de —3°C. Această temperatură de cristalizare (topire) o are o soluție de sare cu concentrația de 45 g/l. Aproximativ 1 l de apă corespunde la 1 kg de gheață. Prin urmare, pentru topirea unei tone de gheață la —3°C, sînt necesare 45 kg de sare. În practică se folosesc cantități mult mai mici, deoarece nu se urmărește topirea completă a gheții.

Cînd se amestecă gheață cu sare, gheața se topește, iar sarea se dizolvă în apă. Dar pentru topire este necesară căldură, iar gheața o absoarbe din mediul înconjurător. Așadar, adăugarea de sare la gheață are ca efect scăderea temperaturii.

Acum ne-am obișnuit să cumpărăm înghețată fabricată. Mai înainte, înghețata se pregătea în casă, iar rolul de răcitor îl juca un amestec de gheață cu sare.

Fierberea soluțiilor

Fenomenul fierberii soluțiilor are multe puncte comune cu fenomenul congelării.

Prezența substanței dizolvate îngreuiază cristalizarea. Din aceleași cauze, substanța dizolvată îngreuiază fierberea. În ambele cazuri, moleculele străine par a se lupta să mențină cît mai mult soluția diluată. Cu alte cuvinte, moleculele străine stabilizează starea substanței principale (adică favorizează existența ei) care le poate dizolva.

De aceea, moleculele străine împiedică lichidul să cristalizeze și deci coboară temperatura la cristalizare. Tot așa, moleculele străine împiedică lichidul să fiarbă și deci ridică temperatura lui de fierbere.

E interesant că, pînă la o anumită limită a concentrației (la soluțiile nu prea concentrate), atît coborîrea temperaturii de crista-

lizare a soluției, cît și ridicarea temperaturii de fierbere, nu depind nicidecum de proprietățile substanței dizolvate, ci este determinată numai de numărul de molecule ale ei. Acest fapt interesant se folosește pentru determinarea masei moleculare a substanței care urmează să fie dizolvată. Această determinare se face cu ajutorul unei formule importante (nu o putem da aici), care leagă variația temperaturii de congelare sau de fierbere cu numărul de molecule din unitatea de volum de soluție (și cu căldura de topire sau de fierbere).

Ridicarea temperaturii de fierbere a apei este de trei ori mai mică decît coborîrea temperaturii de congelare. Astfel, apa de mare, care conține aproximativ 3,5% sare, are punctul de fierbere la 100,6°C, pe cînd temperatura sa de congelare scade cu 2°.

Dacă un lichid fierbe la o temperatură mai înaltă decît altul, atunci tensiunea lui de vapori este mai mică la aceeași temperatură. Așadar, tensiunea de vapori a soluției este mai mică decît tensiunea de vapori a solventului pur. Ne putem da seama de această diferență după următoarele valori: tensiunea de vapori a apei la 20°C este egală cu 17,5 mm Hg, pe cînd tensiunea de vapori a soluției saturate de sare de bucătărie la aceeași temperatură este de 13,2 mm Hg.

Vaporii cu tensiunea de 15 mm Hg, nesaturanți cînd este vorba de apă, vor fi suprasaturanți pentru soluția saturată de sare. În prezența unei astfel de soluții, vaporii încep să se condenseze și să treacă în soluție. Bineînțeles că nu numai o soluție de sare absoarbe vapori de apă din aer, ci și sarea sub formă de praf, căci prima picătură mică de apă care cade pe sare o dizolvă și produce o soluție saturată.

Absorbția vaporilor de apă din aer de către sare are ca rezultat că sarea se umezește. Gospodinele cunosc bine acest lucru, care le cauzează mult necaz. Dar acest fenomen de reducere a tensiunii de vapori deasupra unei soluții aduce și folos: el se folosește la uscarea aerului în practica de laborator. Se trece aerul prin clorură de calciu, care deține recordul în ce privește captarea umidității din aer. Dacă la soluția saturată de sare de bucătărie tensiunea de vapori este de 13,2 mm Hg, în schimb la clorura de calciu ea este de 5,6 mm Hg. Aceasta este valoarea la care scade tensiunea de vapori a apei cînd se trec printr-o cantitate suficientă de clorură de calciu (din care 1 kg „înghite" aproximativ 1 kg de apă). Această umiditate este infimă și deci aerul poate fi considerat ca uscat.

Cum se purifică un lichid de corpurile străine

Una din metodele cele mai importante de purificare a lichidelor de corpurile străine pe care le conțin este distilarea. Se fierbe lichidul și se trimit vaporii lui într-un răcitor. Prin răcire, vaporii se transformă din nou în lichid, dar acest lichid este mai curat decît cel inițial.

Cu ajutorul distilării este ușor de scăpat de substanțele solide dizolvate în lichid. Moleculele acestor substanțe lipsesc aproape complet din vapori. Prin acest procedeu se obține apa distilată, care este apă pură fără nici un gust, lipsită de corpuri străine minerale.

Făcînd uz de evaporare însă, se poate scăpa și de corpurile străine lichide și se poate separa un amestec constînd din două sau mai multe lichide. În acest caz, se folosește faptul că două lichide care formează un amestec nu fierb la fel de „ușor".

Să vedem cum se va comporta în timpul fierberii un amestec de două lichide, de exemplu, un amestec de apă și alcool etilic, luate în proporții egale (votcă de 50 de grade).

La presiune normală, apa fierbe la 100°C, iar alcoolul la 78°C. Amestecul de care e vorba începe să fiarbă la o temperatură intermediară, egală cu 81,2°C. Alcoolul fierbe mai ușor și de aceea tensiunea lui de vapori este mai mare și, în cazul compoziției inițiale de 50% a amestecului, prima porție de vapori va conține 80% alcool.

Porția de vapori obținută se poate trece printr-un răcitor și se poate obține astfel un lichid îmbogățit în alcool. Acest proces se poate repeta mai departe. Este însă clar că acest procedeu nu convine în practică, deoarece la fiecare distilare ulterioară se obține o cantitate de substanță din ce în ce mai mică. Pentru ca să nu se producă astfel de pierderi, în scopul purificării se folosesc așa-numitele coloane de rectificare (sau de epurare).

Construcția se bazează pe următoarea idee. Să ne închipuim o coloană verticală, în partea inferioară a căreia se găsește amestecul lichid. La partea de jos a coloanei se furnizează căldură, iar la partea de sus se efectuează răcirea. Vaporii care se formează în timpul fierberii se ridică în sus și se condensează, iar lichidul astfel format se scurge în jos. Dacă aportul de căldură la partea de jos și evacuarea căldurii la partea de sus a coloanei închise sînt constante, se stabilesc niște curenți de sensuri contrare: unul de vapori, care merge de jos în sus, și altul de lichid, care se scurge în jos.

Să ne fixăm atenția asupra unei secțiuni orizontale oarecare a coloanei. Lichidul trece prin această secțiune de sus în jos, iar vaporii se ridică în sus, dar nici una din substanțele care fac parte din compoziția amestecului lichid nu este reținută. Dacă este vorba de o coloană umplută cu un amestec de alcool și apă, cantitatea de alcool care trece în jos și în sus, ca și cantitatea de apă care trece în jos și în sus, vor fi egale. Întrucît în jos trece lichid, iar în sus trec vapori, înseamnă că la orice înălțime a coloanei compoziția lichidului și compoziția vaporilor sînt identice.

După cum s-a arătat mai înainte, echilibrul lichidului cu vaporii unui amestec de două substanțe necesită, dimpotrivă, ca compoziția fazei lichide să fie diferită de aceea a fazei gazoase. De aceea, la orice înălțime a coloanei are loc o transformare a lichidului în vapori și a vaporilor în lichid. Pe de altă parte, se condensează partea mai puțin volatilă a amestecului, iar din lichid se transformă în vapori componenta mai volatilă.

De aceea, curentul de vapori care merge în sus va colecta oarecum de la toate înălțimile componenta mai volatilă, iar curentul de lichid care se scurge în jos se va îmbogăți neîncetat cu partea mai puțin volatilă. Amestecul va avea de fiecare înălțime o compoziție stabilă diferită: cu cît înălțimea este mai mare, cu atît procentul de componentă mai volatilă este mai ridicat. În cazul ideal, la partea cea mai de sus se va găsi un strat de componentă pură mai volatilă, iar la partea cea mai de jos, un strat de componentă pură mai puțin volatilă.

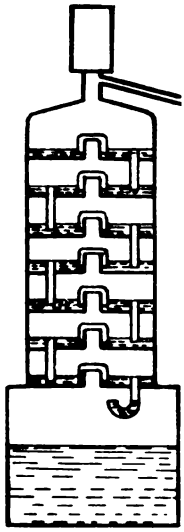


FIG. 107

Acum este necesar să se culeagă cele două substanțe, de sus cea mai volatilă și de jos cea mai puțin volatilă, dar cît se poate mai încet, pentru a nu se deranja situația ideală schițată mai înainte.

Pentru a se realiza în practică separarea sau rectificarea, trebuie să se dea posibilitate curenților de vapori și de lichid mergînd în sensuri contrare să se amestece cum se cuvine. În acest scop curenții de lichid și de vapori sînt frînați cu ajutorul unor talere așezate unul deasupra altuia și comunicînd prin țevi de scurgere. Cînd un taler s-a umplut prea mult, lichidul se poate scurge pe talerele inferioare. Vaporii care urcă sub formă de curent cu mare viteză (0,3—1 m/s) se strecoară prin stratul subțire de lichid. Schema unei coloane este dată în fig. 107.

Nu întotdeauna un lichid se poate purifica complet. Unele amestecuri au o proprietate „neplăcută": la o anumită compoziție a amestecului, raportul dintre componentele moleculelor care se evaporă este același cu raportul componentelor în amestecul lichid. În acest caz, bineînțeles, purificarea mai departe prin metoda descrisă devine imposibilă. Așa este, de exemplu, amestecul de 96% alcool și 4% apă: vaporii lui au aceeași compoziție. De aceea, alcoolul de 96 de grade este cel mai bun care se poate obține prin metoda evaporării.

Rectificarea (sau distilarea) lichidelor este un proces de cea mai mare importanță în tehnologia chimică. Cu ajutorul rectificării se extrage, de exemplu, benzina din petrol.

Este interesant că rectificarea este cel mai ieftin procedeu de obținere a oxigenului. În acest scop, bineînțeles, trebuie în prealabil să se aducă aerul în stare lichidă, după care, prin rectificare, se poate separa în azot și oxigen aproape pure.

Purificarea corpurilor solide

Pe flacoanele cu substanțe chimice se poate vedea, de regulă, alături de denumirea chimică a acestora, și literele: „p", „p.p.a" sau „sp.p". Cu aceste litere se notează în mod convențional gradul de puritate al substanței respective: „p" înseamnă un grad de puritate foarte redus — substanța poate conține o proporție de ordinul a 1% corpuri străine; „p.p.a" înseamnă „pur pentru analiză", adică substanța conține cel mult cîteva zecimi din 1% corpuri străine; „sp.p" înseamnă „spectral pur", adică în substanța respectivă, care se obține greu, analiza spectrală descoperă numai miimi de corpuri străine. Inscripția „sp.p" permite să se spere că substanța se caracterizează, în ce privește puritatea, prin cel puțin „patru de nouă", adică conținutul de substanță de bază este de minimum 99,99%.

Nevoile de corpuri solide pure sînt foarte mari. Pentru multe proprietăți fizice sînt dăunătoare chiar miimi din 1% corpuri străine, iar într-un caz special, care interesează în gradul cel mai înalt tehnica modernă, și anume în problema obținerii materialelor semiconductoare, tehnicienii pretind o puritate cu șapte de nouă. Aceasta înseamnă că un atom inutil la zece milioane de atomi utili poate pune piedici rezolvării unor probleme inginerești. Pentru obținerea unor astfel de materiale extrapure se recurge la metode speciale.

Germaniul și siliciul extrapure (aceștia sînt reprezentanții principali ai materialelor semiconductoare) se pot obține prin extragerea lentă dintr-o soluție a unui cristal care crește. De suprafața siliciului (sau germaniului) topit se apropie o vergea, la capătul căreia este fixat cristalul care servește ca agent de cristalizare. Apoi se ridică vergeaua încet în sus; cristalul care iese din soluție se formează din atomi de substanță de bază, iar atomii de corp străin rămîn în masa topită.

O aplicație mai largă a căpătat așa-numita metodă a topirii zonale. Din elementul ce urmează a fi purificat se confecționează o vergea de o lungime oarecare, cu diametrul de cîțiva milimetri. De-a lungul acestei vergele se deplasează un mic cuptor cilindric care o înconjură de jur împrejur. Temperatura cuptorului este suficientă pentru topire și porțiunea de metal care se găsește în interiorul cuptorului se topește. În modul acesta, de-a lungul vergelei se deplasează o mică zonă de metal topit.

Atomii de corpuri străine se dizolvă de obicei mult mai ușor într-un lichid decît într-un corp solid. De aceea, la limita zonei topite, atomii de corpuri străine din porțiunile solide trec în zona topită și nu invers. Zona topită mobilă pare că trage după ea atomii de corpuri străine împreună cu metalul topit. La întoarcere, cuptorul se scoate din funcțiune și operația de deplasare a zonei topite de-a lungul vergelei de metal se repetă de mai multe ori. După un număr suficient de cicluri, rămîne numai să se reteze capătul plin de impurități al vergelei. Materialele extrapure se obțin în vid sau în atmosferă de gaz inert.

Cînd proporția de atomi străini este mare, purificarea se face prin alte metode; topirea zonală și extragerea cristalului din masa topită se folosesc numai pentru purificarea definitivă a materialului.

Adsorbția

Gazele se dizolvă rareori în corpurile solide, adică rareori pătrund în interiorul cristalelor. În schimb, există alt mijloc de absorbire a gazelor de către corpurile solide. Moleculele de gaz se acumulează pe suprafața corpului solid — această alipire specială se numește adsorbție[1].

[1] A nu se confunda adsorbția cu absorbția, care înseamnă pur și simplu înghițire.

Așadar, adsorbția se produce atunci cînd o moleculă nu poate pătrunde în interiorul corpului, în schimb aderă perfect la suprafața acestuia.

A fi adsorbit înseamnă a fi înghițit de suprafață. Poate, oare, un asemenea fenomen să joace vreun rol mai important, cînd un strat cu grosimea de o moleculă aplicat pe un obiect foarte mare cîntărește o fracțiune infimă de gram?

Să facem un calcul. Suprafața unei molecule nu prea mari este de circa 10 $Å^2$, adică 10^{-15} cm^2. Așadar, pe 1 cm^2 încap 10^{15} molecule. Acest număr de molecule, să zicem de apă, cîntăresc foarte puțin, $3 \cdot 10^{-8}$ g. Chiar și pe un metru pătrat nu intră decît 0,0003 g de apă.

Cantități sensibile de substanță se formează abia pe suprafețe de sute de metri pătrați. La 100 m^2 revin deja 0,03 g de apă (10^{21} molecule).

Dar, oare, în practica de laborator întîlnim vreodată suprafețe atît de mari? Nu e greu totuși de conceput că uneori corpuri foarte mici, care ar putea ocupa vîrful unei linguriță de ceai, au suprafețe enorme de sute de metri pătrați.

Un cub cu latura de 1 cm are suprafața totală de 6 cm^2. Să tăiem acest cub în 8 cuburi de mărime egală, cu latura de 0,5 cm. Aceste cubulețe mai mici au fețe cu suprafața de 0,25 cm^2. În total sînt $6 \times 8 = 48$ fețe. Suprafața lor totală este egală cu 12 cm^2. Așadar, suprafața s-a dublat.

Prin urmare, orice divizare a unui corp face să se mărească suprafața lui. Să divizăm acum cubul cu latura de 1 cm în părticele cu dimensiunea de 1 μ (micron). Un micron este egal cu 10^{-4} cm și deci cubul cel mare se împarte în 10^{12} părticele. Fiecare părticică (pentru simplificare, presupunem că și ea este cubică) are o suprafață de 6 μ^2 adică $6 \cdot 10^{-8}$ cm^2. Aria totală a părticelelor este egală cu $6 \cdot 10^4$ cm^2, adică 6 m^2. Dar divizarea pînă la un micron este departe de a reprezenta o limită.

Este perfect plauzibil că suprafața specifică (adică suprafața unui gram de substanță) se poate exprima prin valori enorme. Ea crește repede pe măsură ce substanța se fărîmițează, căci suprafața unei granule se micșorează proporțional cu pătratul dimensiunii liniare, pe cînd numărul de granule din unitatea de volum crește proporțional cu cubul dimensiunii. Un gram de apă turnată pe fundul unui pahar are o suprafață de cîțiva centimetri pătrați. Același gram de apă sub formă de picături de ploaie va avea o suprafață care măsoară zeci de centimetri pătrați. Dar un gram de picături de ceață are o suprafață de cîteva sute de metri pătrați.

Dacă se sfărîmă cărbunele (cu cît mai mărunt, cu atît mai bine), el este capabil să adsoarbă amoniac, bioxid de carbon și multe gaze toxice. Această ultimă proprietate a asigurat întrebuințarea cărbunelui la măștile de gaze. Cărbunele se fărîmițează deosebit de bine și dimensiunile liniare ale particulelor sale pot fi reduse pînă la cîteva zeci de angströmi. De aceea, un gram de cărbune special are o suprafață de cîteva sute de metri pătrați. O mască de gaze cu cărbune este capabilă să înghită zeci de litri de gaz.

Adsorbția se folosește pe scară largă în industria chimică. Moleculele de diferite gaze, fiind adsorbite pe suprafață, vin în contact strîns una cu alta și intră ușor în reacția chimică. Pentru accelerarea proceselor chimice, adesea se folosește atît cărbune, cît și metale fin mărunțite — nichel, cupru și altele.

Substanțele care accelerează reacția chimică se numesc catalizatori.

Osmoza

Printre țesuturile animale se găsesc unele pelicule speciale care au calitatea de a lăsa să treacă prin ele moleculele de apă, rămînînd impermeabile pentru moleculele de substanțe dizolvate în apă.

Proprietățile acestor pelicule sînt cauza fenomenelor fiziologice care poartă numele de fenomene osmotice (sau pur și simplu, osmoză).

Închipuiți-vă că o astfel de membrană semipermeabilă împarte în două părți un tub în formă de U. Într-o ramură a acestui tub se toarnă o soluție, iar în cealaltă ramură se toarnă apă sau alt solvent. După ce s-a turnat în ambele ramuri aceeași cantitate de lichid, se constată cu surprindere că, deși nivelul lichidelor este același, nu există echilibru. După puțin timp, lichidele se stabilesc la niveluri diferite, și anume se ridică nivelul în ramura în care se găsește soluția. Apa separată de soluție prin membrana semipermeabilă tinde să dilueze soluția. Acest fenomen poartă numele de osmoză iar diferența de înălțime exprimă presiunea osmotică.

Care este cauza care provoacă presiunea osmotică?

În ramura din dreapta a vasului (fig. 108), presiunea este creată numai de apă. În ramura din stînga, presiunea totală se compune din presiunea apei și din presiunea substanței dizolvate. Dar comunicația este deschisă numai pentru apă și echilibrul cînd există membrană semipermeabilă nu se stabilește atunci cînd presiunea din partea stîngă este egală cu presiunea totală din partea

dreaptă, ci atunci cînd presiunea apei curate este egală cu fracțiunea care revine apei din presiunea soluției. Diferența care apare între presiunile totale este egală cu presiunea substanței dizolvate.

Acest surplus de presiune reprezintă tocmai presiunea osmotică. După cum arată experiențele și calculul, presiunea osmotică este egală cu presiunea unui gaz constînd din substanța dizolvată și ocupînd același volum. De aceea nu e de mirare că presiunea osmotică se ridică la cifre impresionante.

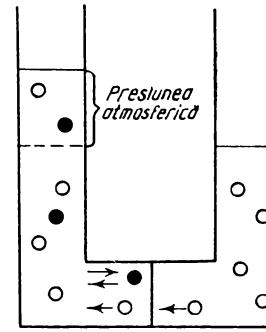


FIG. 108

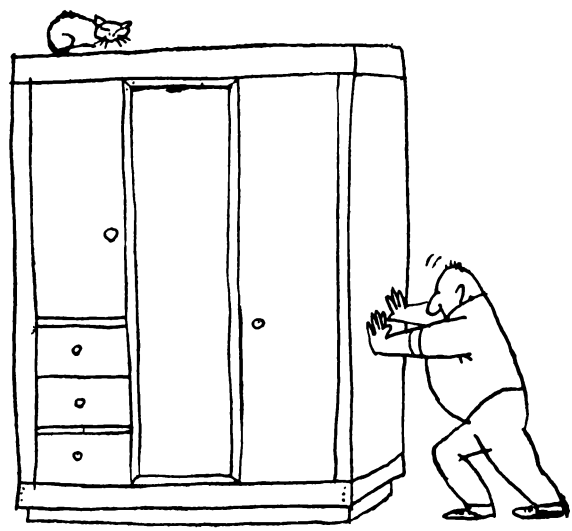
Să calculăm presiunea osmotică care ia naștere în 1 l de apă cînd în această cantitate de apă se dizolvă 20 g zahăr (concentrația zahărului într-un pahar de ceai este, desigur, mai mare). Masa moleculară a zahărului, care are formula chimică $C_{12}H_{22}O_{11}$, este egală cu 342. În condițiile problemei, într-un litru se găsește o fracțiune egală cu 20/342 dintr-un mol de zahăr. Așadar, la un mol de zahăr revine un volum de $\frac{342}{20} = 17{,}1$ l. Dar în condiții normale, adică la 0°C și o presiune de 1 atm, un mol de gaz ocupă 22,4 l. Conform legilor gazelor perfecte, presiunea zahărului considerat ca gaz la 0° ar fi egală cu $\frac{22{,}4}{17{,}1}$ atm, iar la 20°C ar fi de $\frac{22{,}4}{17{,}1} \cdot \frac{293}{273} = 1{,}4$ atm. Aceasta este chiar presiunea relativă a zahărului. În experiența cu membrana semipermeabilă, această presiune osmotică ar echilibra o coloană de apă cu înălțimea de 14 m.

Cu riscul de a trezi în cititori amintiri neplăcute, să analizăm acum ce legătură are cu presiunea osmotică efectul purgativ al soluțiilor de anumite săruri. Pereții intestinelor sînt semipermeabili pentru o serie de soluții. Dacă o sare nu trece prin pereții intestinului (așa este cazul cu sarea lui Glauber), în intestin ia naștere o presiune osmotică, care aspiră apa prin țesuturi din organism în intestin.

De ce apa foarte sărată nu potolește setea? Și de acest lucru este de vină tot presiunea osmotică. Rinichii nu pot secreta urină cu o presiune osmotică mai mare decît presiunea din țesuturile organismului. De aceea, un organism care a absorbit apă sărată de mare nu numai că nu o cedează lichidelor din țesuturi, ci, dimpotrivă, elimină cu urina și apa sustrasă de la țesuturi.

XIV

Frecarea



Forțele de frecare

Nu este prima oară cînd vorbim despre frecare, căci nu există mișcare fără frecare. Aproape orice mișcare a corpurilor care ne înconjură este însoțită de frecare. Un automobil al cărui motor a fost debreiat de șofer se oprește, un pendul se oprește după ce a făcut un număr mare de oscilații, o bilă de metal aruncată într-un borcan cu ulei de floarea-soarelui se cufundă încet în el. Care este cauza că corpurile care se mișcă pe o suprafață se opresc, de ce bila cade încet în ulei? Cauza o constituie forțele de frecare care iau naștere cînd unele corpuri se deplasează de-a lungul suprafeței altora.

Dar forțe de frecare nu iau naștere numai în cazul mișcării. Probabil că ați avut ocazie să mutați o mobilă prin cameră. Știți ce greu este să urniți din loc un dulap greu. Forța care se opune acestui efort se numește forță de frecare de repaus.

Forțele de frecare iau naștere atît cînd tîrîm un obiect, cît și cînd îl rostogolim. Acestea sînt două fenomene fizice puțin diferite. De aceea se distinge o frecare de alunecare și o frecare de rostogolire. Frecarea de rostogolire este de zeci de ori mai mică decît frecarea de alunecare.

Desigur în unele cazuri și frecarea de alunecare se produce cu mare ușurință. Sania alunecă ușor pe zăpadă, iar patinele alunecă pe gheață și mai ușor.

De ce factori depinde forța de frecare?

Forța de frecare dintre corpurile solide depinde destul de puțin de viteza mișcării și este proporțională cu greutatea corpului. Dacă greutatea unui corp se dublează, e de două ori mai greu de urnit din loc și de tîrît. Ne-am exprimat nu tocmai exact: are importanță nu atît greutatea, cît forța care apasă corpul pe suprafață. Dacă corpul este ușor, dar îl apăsăm tare cu mîna, firește, acest lucru are influență asupra forței de frecare. Dacă notăm cu P forța care apasă corpul pe suprafață (de cele mai multe ori greutatea lui), pentru forța de frecare F_f este valabilă următoarea formulă simplă

$$F_f = \mu P.$$

Cum se ține, însă, seama de însușirile suprafeței? Căci se știe prea bine că aceeași sanie, aceleași tălpici alunecă cu totul altfel dacă tălpicile au șine de fier sau nu. De aceste însușiri ține seamă coeficientul de proporționalitate μ. El se numește coeficient de frecare.

Coeficientul de frecare a metalului pe lemn este egal cu 1/2. O placă de metal în greutate de 2 kgf poate fi deplasată pe o masă netedă de lemn numai cu ajutorul unei forțe de 1 kgf. Dar coeficientul de frecare a oțelului pe gheață este egal doar cu 0,027. Aceeași placă poate fi deplasată pe gheață cu o forță de numai 54 gf.

Suprafața nu intră în formula de mai înainte, deoarece frecarea nu depinde de suprafața de contact a corpurilor care se freacă. Aceeași forță este necesară pentru a mișca din loc sau a tîrî cu viteză constantă o tablă lată de oțel în greutate de un kilogram-forță și o greutate de cîntar tot de un kilogram-forță, care se reazemă pe o suprafață mult mai mică.

Încă o observație despre forțele de frecare de alunecare. E ceva mai greu de urnit un corp din loc decît de tîrît: forța de frecare care urmează a fi învinsă în primul moment al mișcării (frecarea de repaus) este mai mare cu 20—30% decît valorile ulterioare ale forței de frecare.

Ce se poate spune despre forța de frecare în cazul rostogolirii, de exemplu, la o roată? Ca și frecarea de alunecare, ea este cu atît mai mare cu cît forța care apasă roata pe suprafață este mai mare. În afară de aceasta, forța de frecare de rostogolire este invers proporțională cu raza roții. Lucrul acesta este ușor de înțeles: cu cît roata este mai mare, cu atît rugozitățile suprafeței pe care se rostogolește au importanță mai mică pentru ea.

Dacă se compară forțele care trebuie să fie învinse la alunecarea unui corp cu cele de la rostogolire, diferența este foarte impresionantă. De pildă, pentru a trage pe asfalt un lingou de oțel în

greutate de 1 t, este necesar să se aplice o forță de 200 kgf; numai atleții pot face acest lucru. Același lingou poate fi transportat însă pe un cărucior și de un copil, fiind necesară în acest scop o forță de cel mult 10 kgf.

Nu este de mirare că frecarea de rostogolire „a învins" frecarea de alunecare și nu degeaba omenirea a adoptat încă din antichitate transportul pe roți.

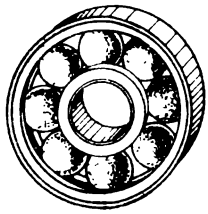


FIG. 109

Înlocuirea tălpicilor cu roțile nu înseamnă încă victoria completă asupra frecării de alunecare, căci roata trebuie să se învîrtească pe o osie. La prima vedere este imposibil să se evite frecarea osiei de lagăre. Așa au crezut oamenii de-a lungul veacurilor și au căutat să micșoreze frecarea de alunecare în lagăre numai cu ajutorul a diferite unsori. Serviciile aduse de unsoare sînt mari, căci frecarea de alunecare se micșorează de 8—10 ori. Dar chiar și cu unsoare frecarea de alunecare este în multe cazuri atît de pronunțată, încît costă extraordinar de scump. La sfîrșitul secolului trecut, acest factor a frînat mult progresul tehnic. Atunci s-a născut ideea remarcabilă de a înlocui în lagăre frecarea de alunecare cu frecarea de rostogolire. Această înlocuire se face cu ajutorul rulmentului cu bile. Între osie și bucșă se pun niște bile. Cînd roata se învîrtește, bilele se rostogolesc în bucșă, iar osia se rostogolește pe bile. În fig. 109 este arătată construcția acestui mecanism. În modul acesta, frecarea de alunecare a fost înlocuită cu frecarea de rostogolire. În același timp, forțele de frecare s-au micșorat de cîteva zeci de ori.

Rolul rulmenților în tehnica modernă este greu de evaluat. Ei se fac cu bile, cu role cilindrice sau cu role conice. Toate mașinile, mari sau mici, sînt înzestrate cu astfel de rulmenți. Există rulmenți cu bile cu diametrul de un milimetru, iar unii rulmenți pentru mașini mari cîntăresc peste o tonă. Se fabrică bile pentru rulmenți (le-ați văzut, desigur, în vitrinele magazinelor de specialitate) cu cele mai diferite dimensiuni — de la o fracțiune de milimetru pînă la cîțiva centimetri.

Frecarea vîscoasă în lichide și gaze

Pînă acum am vorbit despre frecarea „uscată", adică despre frecarea care ia naștere la contactul dintre corpurile solide. Dar și corpurile care plutesc și cele care zboară sînt supuse acțiunii

forțelor de frecare. Nu se schimbă decît sursa de frecare — frecarea „uscată“ este înlocuită de frecarea „umedă“.

Rezistența pe care o întîmpină un corp care se mișcă în apă sau în aer ascultă de alte legi, cu totul diferite de legile frecării uscate despre care am vorbit mai înainte.

Regulile comportării unui lichid și unui gaz în raport cu frecarea nu diferă. De aceea, tot ce se va spune mai departe se referă în aceeași măsură atît la lichide cît și la gaze. Dacă pentru simplificare vom vorbi despre „fluide“, cele spuse se vor referi în egală măsură la lichide și la gaze.

Una din deosebirile frecării „umede“ față de frecarea „uscată“ constă în lipsa frecării de repaus, un obiect care plutește pe apă sau în aer putînd fi urnit din loc, în general, de o forță oricît de mică. În ce privește forța de frecare întîmpinată de un corp în mișcare, ea depinde de viteza corpului, de forma și dimensiunile acestuia și de proprietățile lichidului (gazului). Studiul mișcării corpurilor în lichide și gaze a arătat că nu există o lege unică a frecării „umede“, ci două legi diferite: una adevărată la viteze mici și alta valabilă la viteze mari. Existența a două legi înseamnă că la viteze mari și mici ale corpurilor solide în lichide și gaze, scurgerea fluidului în jurul corpului care se deplasează în el are loc în mod diferit.

La viteze mici, forța de rezistență este direct proporțională cu viteza și cu dimensiunile corpului:

$$F \sim v L.$$

Cum trebuie înțeleasă proporționalitatea cu dimensiunile, dacă nu se spune de ce formă a corpului este vorba? Înseamnă că, la două corpuri absolut asemenea ca formă (adică ale căror dimensiuni sînt toate în același raport), raportul forțelor de rezistență este același ca al dimensiunilor liniare ale corpurilor.

Valoarea rezistenței depinde enorm de proprietățile fluidului. Comparînd forțele de rezistență întîmpinate de obiecte identice care se mișcă cu viteze egale în diferite medii, vedem că un corp întîmpină o rezistență cu atît mai mare cu cît mediul este mai consistent sau, cum se spune, mai vîscos. De aceea, cu drept cuvînt, frecarea de care este vorba se numește frecare vîscoasă. Este ușor de înțeles de ce în aer rezistența vîscoasă este aproximativ de 60 de ori mai mică decît în apă. Lichidele pot fi „nevîscoase“, ca apa, sau foarte vîscoase, ca smîntîna sau mierea.

Gradul de viscozitate al unui fluid se poate aprecia fie după viteza de cădere a corpurilor solide în ele, fie după viteza de scurgere a fluidului prin orificii.

Apa se scurge dintr-o pîlnie de o jumătate de litru în cîteva secunde. Un lichid foarte vîscos se va scurge din ea în cîteva ore, ba chiar și în cîteva zile. Se pot cita exemple de lichide și mai vîscoase. Atenția geologilor a fost atrasă de faptul că în craterele unor vulcani se întîlnesc în acumulările de lavă de pe pantele interioare bucăți sferice. La prima vedere părea absolut de neînțeles că în interiorul unui crater s-a putut forma o astfel de sferă de lavă. Acest lucru e de neînțeles dacă se consideră lava ca un corp solid. Dacă însă lava se comportă ca un fluid, ea se va scurge din pîlnia craterului sub formă de picături, ca orice alt fluid. Diferența este că o astfel de picătură nu se formează într-o fracțiune de secundă, ci în zeci de ani. Cînd picătura devine foarte grea, ea se desprinde de perete și „pică" pe fundul craterului vulcanului.

Din acest exemplu rezultă că nu trebuie să punem pe același picior corpurile solide adevărate și corpurile amorfe care, după cum știm, seamănă mai mult cu fluidele decît cu cristalele. Lava este tocmai un astfel de corp amorf. Ea pare solidă, dar de fapt este un fluid foarte vîscos.

Ce credeți, ceara roșie este un corp solid? Luați două dopuri de plută și puneți-le pe fundul a două cești. Într-una din acestea turnați o sare topită oarecare (de exemplu, silitră, care se procură ușor), iar în cealaltă cu dop în ea turnați ceară roșie. Ambele fluide se vor solidifica și vor îngropa dopurile. Puneți aceste cești într-un dulap și uitați de ele multă vreme. După cîteva luni, veți vedea diferența dintre ceara roșie și sare. Dopul peste care s-a turnat sare stă ca mai înainte pe fundul vasului, pe cînd dopul peste care s-a turnat ceară roșie se găsește la suprafață. Cum s-au petrecut lucrurile? Foarte simplu: dopul din vasul cu ceară roșie a ieșit la suprafață așa cum iese un dop cufundat în apă. Diferența este numai de timp: cînd forțele de frecare vîscoasă sînt mici, dopul se ridică la suprafață instantaneu, pe cînd în fluidele foarte vîscoase, ridicarea la suprafață durează luni de zile.

Forțele de rezistență la viteze mari

Să ne întoarcem la legile frecării „umede". După cum am văzut, la viteze mici rezistența depinde de viscozitatea fluidului, de viteza și de dimensiunile liniare ale corpului. Să examinăm acum legile frecării la viteze mari. Mai întîi însă trebuie să precizăm care viteze se consideră mici și care mari. Pe noi nu ne interesează valoarea absolută a vitezei, ci dacă viteza este suficient de mică

pentru ca să se poată aplica legea frecării vîscoase examinată mai înainte.

Nu se poate fixa un anumit număr de metri pe secundă pentru ca legile frecării vîscoase să fie aplicabile în toate cazurile, la viteze mai mici decît valoarea fixată. Limita de aplicabilitate a legii studiate depinde de dimensiunile corpului și de gradul de viscozitate al fluidului.

Pentru aer sînt „mici" vitezele mai mici de

$$\frac{0{,}75}{L\ [\text{cm}]}\ \frac{\text{cm}}{\text{s}},$$

pentru apă, cele mai mici de

$$\frac{0{,}05}{L\ [\text{cm}]}\ \frac{\text{cm}}{\text{s}},$$

iar pentru fluidele vîscoase, de genul mierii groase, cele mai mici de

$$\frac{100}{L\ [\text{cm}]}\ \frac{\text{cm}}{\text{s}}$$

Așadar, legile frecării vîscoase nu prea sînt aplicabile aerului și, în special, apei: chiar la viteze mici, de ordinul a 1 cm/s, ele sînt valabile numai pentru corpurile foarte mici, cu dimensiuni de ordinul milimetrilor. Rezistența întîmpinată de un om care se cufundă în apă nu ascultă nicidecum de legea frecării vîscoase.

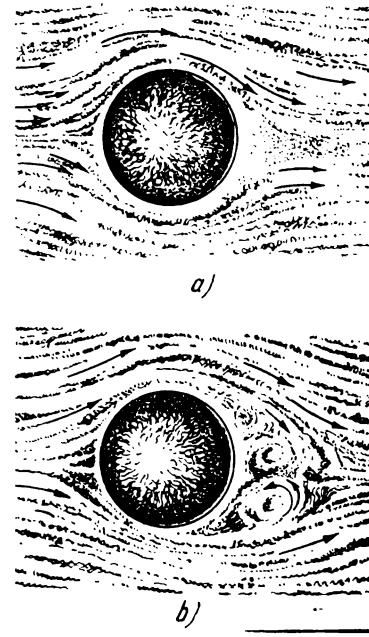


FIG. 110

Cum se explică că, atunci cînd viteza variază, legea rezistenței mediului se modifică? Cauzele trebuie căutate în modificarea caracterului scurgerii fluidului în jurul corpului care se mișcă în el. În fig. 110 sînt reprezentați doi cilindri circulari care se mișcă într-un fluid (axa cilindrului este perpendiculară pe planul figurii). Cînd mișcarea este lentă, fluidul se scurge lin în jurul obiectului în mișcare,

iar forța de rezistență care trebuie să fie învinsă este forța de frecare vîscoasă (fig. 110,*a*). La viteze mari, în spatele corpului în mișcare are loc o mișcare complicată a fluidului (fig. 110,*b*). În fluid, aci apar, aci dispar diferite vine de curent, care formează figuri ciudate, cercuri și vîrtejuri. Imaginea prezentată de firele de curent se schimbă tot timpul.

Rezistența turbulentă depinde de viteza și de dimensiunile obiectului, cu totul altfel decît rezistența vîscoasă: ea este proporțională cu pătratul vitezei și cu pătratul dimensiunilor liniare. Viscozitatea fluidului în cazul acestei mișcări încetează să mai joace un rol esențial: proprietatea determinantă devine densitatea lui, forța de rezistență fiind proporțională cu puterea întîi a densității lichidului (sau gazului). Așadar, pentru forța F a rezistenței turbulente este valabilă formula

$$F \sim \rho v^2 L^2,$$

în care v este viteza, L dimensiunile liniare ale obiectului, iar ρ densitatea mediului. Coeficientul numeric de proporționalitate, pe care nu l-am scris în formulă, are diferite valori, în funcție de forma corpului.

Forma aerodinamică

După cum am mai spus, mișcarea în aer este aproape întotdeauna „rapidă", adică rolul principal îl joacă rezistența turbulentă, nu cea vîscoasă. Avioanele, păsările și parașutiștii întîmpină o rezistență turbulentă. Dacă un om cade în aer fără parașută, după cîtva timp căderea lui începe să fie uniformă (forța de rezistență echilibrează greutatea), dar cu o viteză foarte mare, de ordinul a 50 m/s. Deschiderea parașutei are ca efect întîrzierea mișcării — aceeași greutate este echilibrată acum de rezistența umbrelei parașutei. Întrucît rezistența este proporțională cu viteza și cu dimensiunile obiectului care cade cu aceeași putere, viteza va scădea de atîtea ori de cîte ori cresc dimensiunile liniare ale obiectului. Diametrul parașutei este de 7 m, iar „diametrul" omului este de circa un metru. Prin urmare, viteza de cădere se reduce la 7 m/s. Cu această viteză se poate ateriza fără pericol.

Trebuie să spunem că problema măririi rezistenței se rezolvă mult mai ușor decît problema inversă. Micșorarea rezistenței întîmpinate de un automobil sau de un avion din partea aerului

sau de un submarin din partea apei este o problemă tehnică de cea mai mare importanță și dificilă.

S-a constatat că, modificînd forma corpului, se poate micșora rezistența turbulentă de cîteva ori. În acest scop, trebuie să se reducă la minimum mișcarea turbulentă, care este o sursă de rezistență. La acest rezultat se ajunge dînd obiectului o formă specială, cum se spune, aerodinamică.

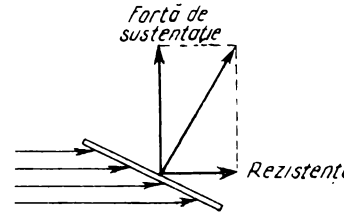


FIG. 111

Care este forma optimă în acest sens? La prima vedere, s-ar părea că trebuie să se dea corpului o formă ascuțită la partea din față. Această parte ascuțită s-ar părea că „despică" aerul cu cel mai mare succes. Dar important nu este să se despice aerul, ci să tulbure cît mai puțin, pentru ca să se scurgă lin în jurul obiectului. Profilul cel mai bun al unui corp care se mișcă într-un lichid sau gaz este forma boantă în față și ascuțită în spate[1]. În acest caz, fluidul se scurge lin de pe partea ascuțită, iar mișcarea turbulentă se reduce la minimum. În nici un caz nu trebuie să se îndrepte unghiurile ascuțite înainte, deoarece ele dau naștere la o mișcare turbulentă.

Forma aerodinamică a aripii de avion nu numai că întîmpină o rezistență minimă la înaintare, dar creează și o forță de sustentație maximă cînd suprafața aerodinamică este înclinată cu marginea superioară în sensul mișcării. Scurgîndu-se în jurul aripii, aerul apasă asupra ei, în special în direcție perpendiculară pe planul ei (fig. 111). Bineînțeles că la o aripă înclinată, această forță este dirijată în sus.

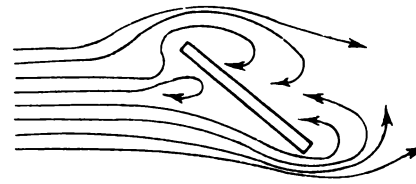


FIG. 112

Pe măsură ce unghiul de înclinare față de direcția mișcării crește, forța de sustentație crește și ea. Dar un raționament bazat numai pe considerente geometrice ne-ar conduce la concluzia greșită că cu cît respectivul unghi este mai mare, cu atît este mai bine. De fapt însă, pe măsură ce unghiul

[1] Prorele ascuțite ale bărcilor și vapoarelor sînt necesare pentru a „tăia" apa, adică numai atunci cînd mișcarea are loc pe suprafață.

se mărește, scurgerea lină în jurul planului aripii devine din ce în ce mai dificilă, iar la o anumită valoare a unghiului, după cum se arată în fig. 112, apare o turbulență puternică; rezistența crește, iar forța de sustentație scade.

Dispariția viscozității

De foarte multe ori, cînd explicăm vreun fenomen sau descriem comportarea vreunui corp, recurgem la exemple cunoscute. E foarte natural, spunem atunci, că dacă un obiect se mișcă într-un anumit fel, și celelalte obiecte similare se vor mișca după aceleași reguli. În majoritatea cazurilor ne satisface o explicație care reduce ceea ce este nou la ceea ce am întîlnit în viața de toate zilele. De aceea n-am întîmpinat dificultăți deosebite explicînd cititorului legile după care se mișcă lichidele, căci oricine a văzut cum curge apa, iar legile acestei mișcări par absolut naturale.

Există, însă, un lichid cu totul ciudat, care nu seamănă cu nici un alt lichid și care se mișcă după niște legi speciale proprii numai lui. Este vorba de heliul lichid.

Am spus deja că heliul lichid rămîne lichid la temperaturi apropiate de zero absolut. Dar heliul la o temperatură de peste 2°K (mai exact 2,19°K) și heliul sub această temperatură sînt două lichide cu totul diferite. Peste două grade, proprietățile heliului nu se deosebesc cu nimic de ale celorlalte lichide. Sub această temperatură, heliul devine un lichid miraculos. Acest heliu miraculos se numește heliu II.

Cea mai uimitoare proprietate a heliului II este suprafluiditatea lui, adică lipsa de viscozitate, descoperită de P.L. Kapița în anul 1938.

Pentru a observa suprafluiditatea, se confecționează un vas pe fundul căruia se găsește o fantă foarte îngustă, cu lățimea doar de o jumătate de micron. Un lichid obișnuit aproape că nu se poate strecura printr-o astfel de fisură; tot așa se comportă și heliul la temperaturi de peste 2,19°K. Îndată însă ce temperatura scade sub 2,19°K, viteza de scurgere a heliului crește brusc de cel puțin o mie de ori. Heliul II se scurge prin fanta extrem de fină aproape instantaneu, adică își pierde complet viscozitatea. Suprafluiditatea heliului are ca urmare și alt fenomen mai ciudat. Heliul II are proprietatea de a „fugi" din paharul sau eprubeta în care a fost turnat.

În fig. 113 este dată schema acestei experiențe. Eprubeta cu heliu II se pune într-un vas Dewar deasupra unei băi de heliu. Netam-nesam, heliul II se ridică pe pereții eprubetei sub formă de peliculă extrem de subțire absolut invizibilă și se revarsă peste buza eprubetei, de pe fundul căreia picură în vas.

Să nu se uite că, datorită forțelor capilare, despre care s-a vorbit la pag. 193, moleculele oricărui lichid care umezește pereții vasului se ridică în sus pe acești pereți și formează pe ei o peliculă extrem de subțire, a cărei grosime este, ca ordin de mărime, egală cu a milioana parte dintr-un centimetru. Această peliculă este invizibilă cu ochiul liber și în general nu se manifestă în nici un chip la un lichid vîscos obișnuit.

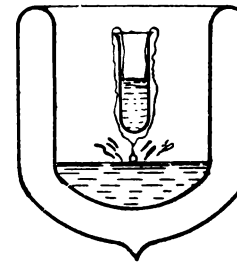


FIG. 113

Situația se schimbă complet dacă avem de-a face cu heliul lipsit de viscozitate. Fanta îngustă nu reprezenta un obstacol pentru mișcarea heliului suprafluid, iar pelicula superficială subțire este ca și o fantă îngustă. Lichidul lipsit de viscozitate se scurge sub formă de strat extrem de subțire. Peste marginea paharului sau a eprubetei pelicula superficială formează un sifon prin care heliul se revarsă din pahar.

Bineînțeles că la un lichid obișnuit nu observăm nimic asemănător. Dacă viscozitatea este normală, lichidul din stratul cu grosime infimă nu se poate „urca" prin sifon aproape de loc. Această deplasare este atît de lentă încît scurgerea ar dura milioane de ani.

Așadar, heliul II nu are nici o viscozitate. S-ar părea, după logica cea mai riguroasă, că de aici se poate trage concluzia că un corp solid se va mișca fără frecare într-un astfel de lichid. Să introducem în heliul lichid un disc suspendat de un fir și să răsucim puțin acest fir. Dacă lăsăm liber acest dispozitiv simplu, el devine un fel de pendul — firul cu discul va oscila și se va răsuci cînd într-un sens, cînd în celălalt. Dacă nu există frecare, e de așteptat ca discul să oscileze veșnic. Dar nici vorbă de așa ceva. După un timp relativ scurt, aproximativ egal cu acela din cazul heliului I obișnuit sau normal (adică heliu de temperatură de peste 2,19°K), discul se oprește. Ce curios! Cînd se scurge prin fantă, heliul II se comportă ca un lichid fără viscozitate, iar în raport cu corpurile care se mișcă în el se comportă ca un lichid vîscos obișnuit. În adevăr, așa ceva este cu totul neobișnuit și de neînțeles.

Ne rămîne acum să amintim ceea ce am spus în legătură cu faptul că heliul nu se solidifică pînă la zero absolut. Este vorba de faptul că ideile noastre obișnuite despre mișcare nu ar mai fi aplicabile. Dacă heliul rămîne lichid „împotriva legii", mai e de mirare că acest lichid are o comportare așa de arbitrară?

Comportarea heliului lichid se poate înțelege numai din punctul de vedere al noilor concepții despre mișcare, care au căpătat denumirea de mecanică cuantică. Vom încerca să dăm o idee cît se poate de generală despre modul cum explică mecanica cuantică comportarea heliului lichid.

Mecanica cuantică este o teorie foarte subtilă și greu de înțeles; cititorul să nu se mire că explicația pare și mai ciudată decît însuși fenomenul. Adevărul este că fiecare particulă de heliu lichid ia parte în același timp la două mișcări: o mișcare suprafluidă, fără nici o legătură cu viscozitatea, și alta obișnuită.

Heliul II se comportă ca și cum ar consta dintr-un amestec de două lichide care se mișcă complet independent „unul prin altul". Un lichid are comportare normală, adică are viscozitate obișnuită, iar celălalt component este suprafluid.

Cînd heliul II se scurge prin fantă sau se revarsă peste marginea paharului, observăm efectul suprafluidității. În cazul oscilației discului, cufundat în heliu însă frecarea care oprește discul se produce datorită faptului că în partea normală a heliului frecarea discului este inevitabilă.

Însușirea de a participa la cele două mișcări diferite dă naștere și unor proprietăți cu totul neobișnuite de conductibilitate termică a heliului. După cum s-a mai spus, în general lichidele conduc prost căldura. Heliul I se comportă și el ca un lichid obișnuit. Cînd, însă, se produce transformarea în heliu II, conductibilitatea termică crește aproximativ de un miliard de ori. Așadar, heliul II conduce căldura mai bine decît cele mai bune conducătoare obișnuite de căldură, cum sînt cuprul și argintul.

Adevărul este că mișcarea suprafluidă a heliului nu participă la transmiterea căldurii. De aceea, cînd în heliul II se produce o cădere de temperatură, apar doi curenți de sensuri opuse, dintre care unul — cel normal — transportă căldura. Acest fenomen nu seamănă absolut de loc cu conductibilitatea termică obișnuită. Într-un lichid obișnuit, căldura se transmite prin ciocnirile moleculelor. În heliul II, căldura curge împreună cu partea obișnuită a heliului, și anume curge ca un lichid. În acest caz, termenul de „flux de căldură" este pe deplin justificat. Acest mod de transmitere a căldurii are ca efect o conductibilitate termică enormă.

Această explicație a conductibilității termice este atît de stranie încît, poate, veți refuza s-o admiteți. Vă puteți, însă, convinge de adevărul celor spuse în mod direct făcînd următoarea experiență simplă, după părerea mea.

Într-o baie cu heliu lichid se găsește un vas Dewar, de asemenea umplut cu heliu. Acest vas comunică cu baia printr-un tub capilar. Heliul din interiorul vasului se încălzește cu ajutorul unei spirale electrice; căldura nu va trece la heliul înconjurător din baie, deoarece pereții vasului nu transmit căldura.

În dreptul tubului capilar se găsește o aripioară suspendată de un fir subțire. Dacă căldura curge ca un lichid, ea trebuie să învîrtească aripioara. De fapt, chiar așa și face. În timpul acesta, cantitatea de heliu din vas nu se modifică. Cum se explică acest fenomen miraculos? Într-un singur fel: prin încălzire ia naștere un curent format din partea normală a lichidului de la locul mai cald spre cel mai rece și un curent de sens invers format din partea suprafluidă a lichidului. Cantitatea de heliu în fiecare punct nu variază, dar deoarece o dată cu transportul de căldură se deplasează și partea normală a lichidului, aripioara se rotește datorită frecării vîscoase a acestei părți și rămîne deviată, atîta timp cît durează încălzirea.

Din faptul că mișcarea suprafluidă nu transportă căldura, rezultă și altă concluzie. Mai înainte s-a vorbit despre „tîrîrea" heliului peste buza paharului. Din pahar însă „fuge" partea suprafluidă pe cînd cea normală rămîne pe loc. Căldura este asociată numai cu partea normală a heliului; ea nu însoțește partea suprafluidă, care „fuge" din pahar. Așadar, pe măsură ce heliul „fuge" din vas, aceeași cantitate de căldură revine la o cantitate din ce în ce mai mică de heliu și, prin urmare, heliul care rămîne trebuie să se încălzească. Acest lucru se observă, de fapt, în cursul experienței.

Masele de heliu care se găsesc în mișcare suprafluidă și în mișcare normală nu sînt egale. Raportul lor depinde de temperatură. Cu cît temperatura este mai joasă, cu atît masa părții suprafluide a heliului este mai mare. La zero absolut, tot heliul devine suprafluid. Pe măsură ce temperatura se ridică, o parte tot mai mare din heliu începe să se comporte normal, iar la temperatura de 2,19°K tot heliul devine normal și capătă proprietățile unui lichid normal.

Probabil că cititorului îi stau pe limbă întrebările: ce este acest heliu suprafluid, cum poate o particulă de lichid să participe în același timp la două mișcări, cum se explică însuși faptul că o

particulă poate avea două feluri de mișcări?... Din păcate, sîntem siliți să lăsăm toate aceste întrebări fără răspuns aici. Teoria heliului II este prea complicată și, pentru a o înțelege, este nevoie de multe cunoștințe prealabile.

Plasticitatea

Elasticitatea este însușirea unui corp de a reveni la forma lui anterioară după ce forța care l-a deformat a încetat să mai acționeze asupra lui. Dacă de o sîrmă de oțel cu lungimea de 1 m și cu secțiunea de 1 mm^2 se suspendă o greutate de 1 kgf, sîrma se întinde. Întinderea este foarte mică, doar de 0,05 mm, dar se poate observa fără dificultate. Dacă se înlătură greutatea suspendată de ea, sîrma se scurtează tot cu 0,05 mm și reperul revine la poziția sa de mai înainte. Această deformație se numește deformație elastică.

Observăm că o sîrmă cu secțiunea de 1 mm^2, sub influența unei forțe de 1 kgf, și o sîrmă cu secțiunea de 1 cm^2, sub influența unei forțe de 100 kgf, se găsesc, cum se spune, în condiții de tensiune mecanică identice. De aceea, trebuie să se descrie întotdeauna comportarea unui material, indicîndu-se nu forța (acest lucru nu are rost, dacă nu se cunoaște secțiunea corpului), ci tensiunea, adică forța care revine la unitatea de suprafață a secțiunii. Corpurile obișnuite — metalele, sticla, pietrele — pot fi tensionate elastic, în cel mai bun caz, doar cu cîteva procente. Proprietăți elastice excepționale are cauciucul. Cauciucul poate fi tensionat elastic cu cîteva sute la sută (adică lungimea lui poate fi făcută de două ori sau de trei ori mai mare decît cea inițială), dar cînd se dă drumul unui astfel de cordon de cauciuc, vedem că revine la starea inițială.

Toate corpurile, fără excepție, se comportă elastic sub influența forțelor relativ mici. Dar limita comportării elastice este atinsă la unele corpuri mai curînd, iar la altele mult mai tîrziu. De exemplu, la metalele moi, cum este plumbul, limita de elasticitate este atinsă dacă se suspendă de capătul unei sîrme cu secțiunea de 1 mm o greutate de 0,2—0,3 kgf. La materialele dure, cum este oțelul, această limită este aproximativ de 100 de ori mai ridicată, adică este de circa 25 kgf.

În raport cu forțele mari, care depășesc limita de elasticitate, diferitele corpuri se pot împărți, în mare, în două clase: fragile, cum este sticla, și plastice, cum este argila.

Dacă se apasă o bucată de argilă cu degetul, acesta lasă o amprentă care reproduce exact desenul complicat al pielii. Dacă

se loveşte cu un ciocan o bucată de fier moale sau de plumb, ciocanul lasă o urmă precisă. Deşi acţiunea a încetat, deformaţia a rămas; ea se numeşte deformaţie plastică sau permanentă. Astfel de urme permanente nu se pot produce pe sticlă: dacă se stăruie în această situaţie, sticla se sparge. Tot aşa de fragile sau casante sînt şi unele metale şi aliaje, de exemplu, fonta. O găleată de fier, dacă se bate cu ciocanul, se turteşte, dar un ceaun de fontă se sparge.

Despre fragilitatea corpurilor ne putem face o idee după următoarele valori. Pentru a preface în pulbere o bucată de fontă, trebuie să se acţioneze cu o forţă de circa 50—80 kgf pe milimetru pătrat de suprafaţă. Pentru cărămidă, această valoare scade la 1,5—3 kgf.

Ca orice clasificare, împărţirea corpurilor în corpuri fragile şi corpuri plastice este destul de convenţională. În primul rînd, un corp fragil la temperaturi scăzute poate deveni plastic la temperaturi înalte. Sticla se poate prelucra excelent ca un material plastic, dacă se încălzeşte la o temperatură de cîteva sute de grade.

Metalele moi, cum este plumbul, se pot forja la rece, dar metalele dure se forjează numai la cald, în stare incandescentă. Ridicarea temperaturii măreşte proprietăţile plastice ale materialelor.

Una din particularităţile esenţiale ale metalelor, datorită căreia ele au devenit materiale de construcţie de neînlocuit, este duritatea lor la temperatura camerei şi plasticitatea lor la temperaturi înalte. Metalelor incandescente li se poate da cu uşurinţă forma necesară, pe cînd la temperatura camerei nu se poate modifica această formă decît cu ajutorul unor forţe considerabile.

O influenţă serioasă are asupra proprietăţilor mecanice ale unui material structura internă a acestuia. Fisurile şi golurile slăbesc rezistenţa mecanică a corpurilor şi le fac mai fragile.

Este interesantă însuşirea corpurilor plastic deformabile de a-şi mări rezistenţa. Un cristal individual de metal, care abia s-a format din masa topită, este foarte moale. Cristalele multor metale sînt atît de moi încît ar putea fi uşor îndoite cu degetele, dar... cînd încerci să le îndoi, nu izbuteşti, fiindcă se întăresc. Pentru a deforma plastic un astfel de cristal, este nevoie de o forţă foarte mare. Adevărul e că plasticitatea este nu numai o însuşire a materialului, ci depinde şi de prelucrarea acestuia.

De ce o sculă nu se fabrică din metal turnat, ci din metal forjat? Cauza este uşor de înţeles: un metal supus la forjare (sau laminare, sau tragere) este mult mai rezistent decît un metal turnat.

Oricît s-ar forja un metal, rezistenţa lui nu poate fi sporită peste o anumită limită, care se numeşte limita de curgere. La oţel, această limită este cuprinsă în intervalul 30—50 kgf/mm^2.

Această valoare înseamnă următorul lucru. Dacă de o sîrmă cu secțiunea de 1 mm^2 se atîrnă o greutate de un pud[1] (mai mică decît limita de curgere), sîrma începe să se întindă și să devină mai rezistentă. De aceea, întinderea încetează repede, iar greutatea atîrnă liniștită de sîrmă. Dacă însă se atîrnă de această sîrmă o greutate de 2—3 puduri (mai mare decît limita de curgere), situația se schimbă. Sîrma se va întinde neîncetat (va curge) pînă ce se va rupe. Subliniem încă o dată că comportarea mecanică a unui corp nu este determinată de forță, ci de tensiunea la care este supus. O sîrmă cu secțiunea de 100 μ^2 (microni pătrați) va curge sub influența unei sarcini de 30—50 $\cdot 10^{-4}$ kgf, adică 3—5 gf.

Duritatea

Rezistența și duritatea nu merg mînă în mînă. O frînghie, o bucată de postav sau un fir de mătase pot avea o rezistență foarte mare, căci este necesar un efort considerabil pentru a le rupe. Bineînțeles că nimeni nu spune că frînghia sau postavul sînt materiale dure. Invers, rezistența sticlei este redusă, dar sticla este un material dur.

Noțiunea de duritate, de care se face uz în tehnică, a fost împrumutată din viața practică de toate zilele. Duritatea înseamnă opunerea la pătrundere. Un corp este dur dacă se zgîrie greu sau dacă este greu de lăsat o amprentă pe el. Aceste diferențe pot părea cititorului cam vagi. Sîntem obișnuiți ca o noțiune fizică să se exprime în cifre. Cum se poate exprima duritatea în cifre?

O metodă foarte primitivă, dar în același timp utilă în practică este folosită de mult de mineralogi. Se pun la rînd zece minerale determinate. Primul este diamantul, după el vine corindonul, apoi urmează topazul, cuarțul, feldspatul, apatitul, fluorina, calcitul, ghipsul și talcul. Această serie a fost aleasă în modul următor: diamantul zgîrie toate mineralele, dar nici unul din aceste minerale nu poate zgîria diamantul. Aceasta înseamnă că diamantul este cel mai dur mineral. Duritatea diamantului se notează cu numărul 10. Corindonul, care urmează după diamant, este mai dur decît toate celelalte minerale care vin după el și deci le poate zgîria. Corindonului i se atribuie numărul 9 de duritate. Cu numerele 8, 7 și 6 se notează pe aceeași bază, respectiv, topazul, cuarțul și feldspatul. Fiecare din ele este mai dur (adică poate zgîria)

[1] 1 pud = 16,381 kgf. — *N.T.*

decît toate mineralele de după ele, dar este mai moale (poate fi zgîriat) decît mineralele care au o duritate mai mare. Cel mai moale mineral este talcul, care are duritatea 1.

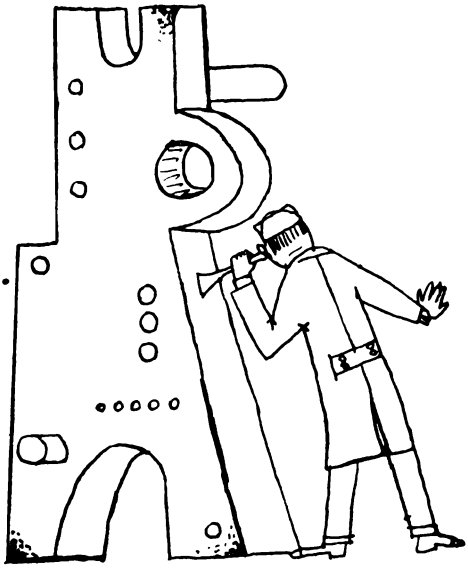
„Măsurarea" (acest cuvînt trebuie pus între ghilimele) durității cu ajutorul acestei scări constă în găsirea locului mineralului în șirul de zece etaloane indicate.

Dacă un mineral necunoscut poate fi zgîriat de cuarț, dar el însuși zgîrie feldspatul, duritatea lui este egală cu 6,5.

Metalurgii se servesc de alt mijloc pentru a determina duritatea. Se face pe materialul de încercat o gropiță cu ajutorul unei bile de oțel cu diametrul de 1 cm, apăsată cu o forță standardizată (de obicei, de 3 000 kgf). Raza gropiței astfel formate se ia ca valoare a durității.

Duritatea în raport cu zgîrierea și duritatea în raport cu imprimarea nu coincid neapărat; astfel un material poate fi mai dur decît altul cînd se încearcă la zgîriere, dar mai moale decît el cînd se încearcă la imprimare.

Așadar, nu există o noțiune universală de duritate, care să nu depindă de metoda de măsurare. De aceea, noțiunea de duritate face parte dintre noțiunile tehnice, nu fizice.



XV

Sunetul

Oscilațiile sonore

Am prezentat deja cititorului multe date despre oscilații. Al cincilea capitol al lucrării de față a fost consacrat oscilațiilor pendulului, oscilațiilor bilei atîrnate de un resort, legilor oscilației unei coarde și altor probleme asemănătoare. N-am vorbit însă despre ce se întîmplă cînd un corp efectuează oscilații în aer sau în alt mediu. Nu încape îndoială că mediul nu poate rămîne indiferent la oscilații. Obiectul care oscilează împinge aerul și deplasează particulele de aer din poziția în care se găseau mai înainte. Este de la sine înțeles că efectul nu se limitează numai la stratul de aer cel mai apropiat de corp. Corpul comprimă stratul cel mai apropiat, acesta apasă pe cel următor și așa mai departe, strat după strat, particulă după particulă, tot aerul înconjurător punîndu-se în mișcare. Spuneam atunci că aerul a ajuns în stare de oscilație sau că în aer se produc oscilații sonore.

Numim sonore oscilațiile mediului, dar aceasta nu înseamnă că auzim toate oscilațiile sonore. Fizica se servește de noțiunea de oscilații sonore într-un înțeles mai larg. Despre oscilațiile sonore pe care le auzim se va vorbi mai departe.

Se vorbește despre aer pentru simplul motiv că sunetul se propagă de cele mai multe ori prin aer, dar aerul nu are proprietăți speciale ca să aibă monopolul asupra dreptului de a efectua oscilații sonore. Oscilațiile sonore iau naștere în orice mediu care se poate comprima

și, întrucît în natură nu există corpuri incompresibile, înseamnă că particulele oricărui material se pot găsi în aceste condiții. Partea din fizică care se ocupă de astfel de oscilații se numește acustică.

În cazul oscilațiilor sonore, fiecare particulă de aer rămîne, în medie, pe loc; ea efectuează numai oscilații în jurul poziției de echilibru. În cazul cel mai simplu, o particulă de aer poate efectua oscilații armonice care, după cum ne amintim, au loc după legea sinusului. O astfel de oscilație se caracterizează prin deplasarea maximă de la poziția de echilibru — amplitudinea — și prin perioada de oscilație, adică timpul necesar pentru efectuarea unei oscilații complete.

Pentru descrierea proprietăților oscilațiilor sonore, de cele mai multe ori se face uz de noțiunea de frecvență a oscilațiilor în loc de perioadă. Frecvența $\nu = \frac{1}{T}$ este mărimea inversă perioadei. Unitatea de frecvență este inversul secundei, s^{-1}, adică o perioadă pe secundă; această unitate se mai numește hertz (Hz). Dacă frecvența unei oscilații este egală cu 100 s^{-1}, înseamnă că într-o secundă o particulă de aer efectuează 100 de oscilații complete. În loc să spunem „100 de inverse ale secundei", se poate spune: „100 Hz" sau „100 de perioade pe secundă". Întrucît în fizică avem de-a face de foarte multe ori cu frecvențe care sînt de un mare număr de ori mai mari decît hertzul, se folosesc pe scară largă unitățile kilohertz (sau kilociclu) și megahertz (sau megaciclu): 1 kHz = 10^3 Hz, 1 MHz = 10^6 Hz.

La trecerea prin poziția de echilibru, viteza particulelor care oscilează este maximă. Dimpotrivă, în pozițiile extreme, viteza particulelor devine, natural, egală cu zero. Am mai spus că, dacă deplasarea particulelor se supune legii oscilațiilor armonice, atunci și variația vitezei de oscilație urmează aceeași lege. Dacă se notează amplitudinea deplasării cu a_0, iar viteza cu v_0, avem $v_0 = 2\pi \frac{a_0}{T}$ sau $v_0 = 2\pi\nu \cdot a_0$. O conversație cu voce tare pune particulele de aer în oscilație cu amplitudinea doar de cîteva milionimi de centimetru. Valoarea maximă (de amplitudine) a vitezei va fi de ordinul a 0,02 cm/s.

Altă mărime fizică importantă, care variază împreună cu deplasarea și viteza particulei, este excesul de presiune, numit și presiune acustică. Oscilațiile sonore ale aerului constau din alternanța periodică a presiunii și depresiunii în fiecare punct al mediului. Presiunea aerului într-un punct oarecare este cînd mai mare, cînd mai mică decît presiunea care ar exista în lipsa sunetului. Acest exces (sau deficit) de presiune se numește presiune acustică.

Presiunea acustică reprezintă doar o mică fracțiune din presiunea normală a aerului. În exemplul nostru — o conversație cu voce tare — amplitudinea presiunii acustice este egală cu a milioana parte dintr-o atmosferă. Presiunea acustică este direct proporțională cu viteza de oscilație a particulei, raportul dintre aceste mărimi

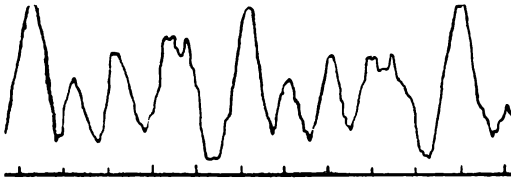


FIG. 114

fizice depinzînd numai de proprietățile mediului. De exemplu, unei presiuni acustice în aer de 1 dyn/cm^2 îi corespunde o viteză de oscilație de 0,025 cm/s.

O coardă care oscilează după legea sinusului pune și particulele de aer în mișcare armonică. Zgomotele și sunetele muzicale complexe prezintă un tablou mult mai complicat. În fig. 114 este reprezentată înregistrarea unor oscilații sonore, și anume presiunea acustică în funcție de timp. Această curbă seamănă prea puțin cu o sinusoidă. Adevărul este că orice oscilație, oricît de complexă, poate

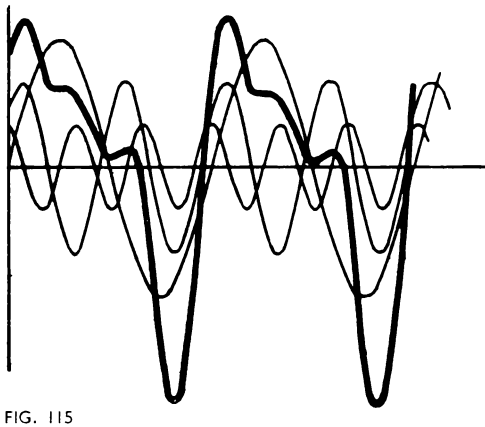


FIG. 115

fi concepută ca rezultatul suprapunerii unui mare număr de sinusoide cu diferite amplitudini și frecvențe, sinusoide care reprezintă oscilații simple. Aceste oscilații simple formează, cum se spune, spectrul oscilației complexe. Un exemplu simplu de astfel de suprapunere de oscilații este arătat în fig. 115.

Viteza sunetului

Nu trebuie să vă mai temeți de trăsnet după ce ați auzit tunetul. Dar de ce? În adevăr, lumina se propagă incomparabil mai repede decît sunetul — aproape instantaneu. Tunetul și fulgerul se produc în același moment, dar fulgerul îl vedem în momentul cînd ia naștere, pe cînd tunetul ajunge la noi cu o viteză de aproximativ un kilometru în trei secunde (viteza sunetului în aer este de 330 m/s). Așadar, cînd auzim tunetul, pericolul de a fi loviți de trăsnet a trecut.

Cunoscînd viteza de propagare a sunetului, se poate determina la ce distanță se găsește furtuna. Dacă din momentul cînd scapără fulgerul pînă în momentul cînd bubuie tunetul au trecut 12 s, înseamnă că furtuna este la 4 km de noi.

Viteza sunetului în gaze este aproximativ egală cu viteza medie a moleculelor de gaz. Nici ea nu depinde de densitatea gazului și este proporțională cu rădăcina pătrată din temperatura absolută. Lichidele conduc sunetul mai repede decît gazele. În apă sunetul se propagă cu viteza de 1 450 m/s, adică de 4,5 ori mai repede decît în aer. Și mai mare este viteza sunetului în corpurile solide, de exemplu, în fier, unde este de circa 6 000 m/s.

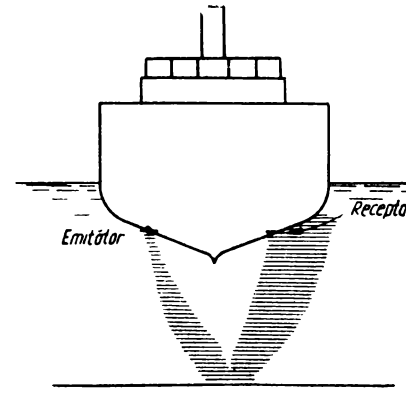


FIG. 116

Cînd sunetul trece dintr-un mediu într-altul, viteza de propagare se modifică. În același timp însă, se produce și alt fenomen interesant — reflectarea parțială a sunetului la limita dintre cele două medii. Fracțiunea de sunet care se reflectă depinde în special de raportul densităților. În cazul în care sunetul vine din aer și cade pe suprafețe solide, ori invers, dintr-un mediu dens trece în aer, sunetul se reflectă aproape complet. Cînd sunetul trece din aer în apă sau, invers, din apă în aer, în cel de-al doilea mediu trece doar 1/1 000 din sunet. Dacă ambele medii sînt dense, raportul dintre sunetul care merge mai departe și cel reflectat poate fi chiar mai mic. De exemplu, din apă în

oțel sau din oțel în apă trece doar 13% din sunet, restul de 87% din sunet reflectîndu-se.

Fenomenul reflexiei sunetului se folosește pe scară largă în navigație. Pe el se bazează construcția unui instrument pentru măsurarea adîncimilor — sonda acustică (fig. 116). La unul din bordurile unui vas se suspendă sub apă o sursă de sunete. Sunetul sacadat produce unde sonore, care trec prin tot stratul de apă pînă la fundul mării sau rîului, se reflectă de fund, iar o parte din sunet se întoarce la vas, unde este captat de instrumente sensibile. Un cronometru de precizie indică cît timp i-a trebuit sunetului pentru această călătorie. Viteza sunetului în apă este cunoscută, așa că, printr-un calcul simplu, se pot obține informații precise în legătură cu adîncimea apei.

Dirijînd sunetul nu în jos, ci înainte sau în lături, se poate stabili, cu ajutorul lui, dacă nu cumva în jurul vasului se găsesc stînci subacvatice periculoase sau aisberguri cufundate adînc în apă.

Unda sonoră

Dacă sunetul s-ar propaga instantaneu, toate particulele de aer ar oscila ca una singură. Dar sunetul nu se propagă instantaneu și volumele de aer situate pe linia de propagare intră în mișcare pe rînd, adică par a fi cuprinse de o undă care pornește de la sursa sunetului. Tot așa, o surcea stă liniștită pe apă pînă ce undele circulare de apă formate de o pietricică aruncată în ea o cuprinde și o pune în mișcare de oscilație.

Să ne îndreptăm atenția asupra unei particule care oscilează și să comparăm mișcarea ei cu a celorlalte particule situate pe aceeași linie de propagare a sunetului. Particula vecină intră în oscilație ceva mai tîrziu, următoarea și mai tîrziu și așa mai departe. Această întîrziere va crește, pînă ce, în sfîrșit, dăm peste o particulă care a rămas în urmă cu o perioadă întreagă și de aceea oscilează în același ritm cu cea inițială, așa cum un alergător slab care a rămas în urmă cu un tur întreg de pistă poate trece linia de sosire în același timp cu cîștigătorul cursei. La ce distanță vom întîlni punctul care oscilează în același ritm cu cel inițial? Nu este greu de văzut că această distanță λ este egală cu produsul dintre viteza de propagare c a sunetului și perioada de oscilație T. Distanța λ se numește lungime de undă

$$\lambda = cT.$$

La intervale egale cu λ vom întîlni alte puncte care oscilează în același ritm. Punctele situate la distanța $\lambda/2$ vor efectua unul față de altul aceeași mișcare ca un obiect care oscilează perpendicular pe o oglindă față de imaginea sa.

Dacă reprezentăm deplasarea (sau viteza, sau presiunea acus-

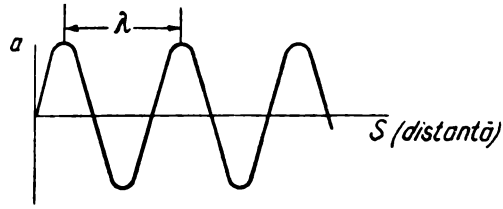


FIG. 117

tică) a tuturor punctelor situate pe direcția de propagare a sunetului armonic, obținem tot o sinusoidă.

Să nu se confunde diagrama mișcării ondulatorii cu diagrama oscilațiilor. Figurile 117 și 118 sînt foarte asemănătoare, dar în prima pe axa orizontală este luată distanța, pe cînd în a doua figurează timpul. Una din figuri reprezintă desfășurarea în timp a unei oscilații, iar cealaltă este „fotografia" instantanee a unei unde. Din compararea acestor figuri se vede că lungimea de undă poate fi numită și perioada în spațiu: rolul lui T în timp îl joacă în spațiu mărimea λ.

În figura undei sonore, deplasările particulelor sînt puse pe verticală, iar direcția de propagare a undei, de-a lungul căreia

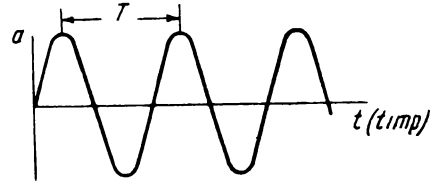


FIG. 118

se socotește distanța, este orizontală. Aceasta poate sugera ideea că particulele se deplasează perpendicular pe direcția de propagare a undei. În realitate, particulele de aer oscilează pe direcția de propagare a sunetului. O astfel de undă se numește undă longitudinală.

Sunetul audibil

Care oscilații sonore sînt recepționate de auzul omului? Urechea este capabilă să perceapă numai oscilațiile situate aproximativ în intervalul de la 20 la 20 000 Hz.

Sunetele cu frecvențe mari se numesc înalte, iar cele cu frecvențe mici se numesc joase.

Ce lungimi de undă corespund frecvențelor de la limita audibilității? Întrucît viteza sunetului este aproximativ egală cu 300 m/s, cu ajutorul formulei $\lambda = cT = \frac{c}{\nu}$ vom găsi că lungimile undelor sonore auzibile sînt cuprinse între 15 m pentru tonurile cele mai joase și 3 cm pentru cele mai înalte.

În ce mod „auzim" aceste oscilații?

Funcționarea organului nostru auditiv se bazează pe fenomenul de rezonanță. Vă amintiți că așa se numește fenomenul de legănare a unui corp cînd oscilațiile exterioare și oscilațiile proprii ale corpului sînt identice. Rezonanța acustică se poate demonstra ușor. Deschideți capacul unui pian, luați o chitară și scoateți din ea un ton pur oarecare. Apoi ascultați: pianul răspunde; a intrat în oscilație coarda pianului acordată pe aceeași frecvență cu coarda pe care am atins-o a chitarei.

În interiorul urechii se găsesc circa 4 500 de fibre de diferite lungimi. Natura a acordat aceste fibre pe toate tonurile posibile. Timpanul transmite oscilațiile la aceste fibre extrem de subțiri, dar intră în oscilație numai acelea care sînt acordate pe tonul corespunzător.

Unii oameni au facultatea că deosebesc absolut tonurile: dacă luați la pian un acord, cel ce ascultă poate spune pe ce clape ați apăsat. Aceasta înseamnă că urechea sa este capabilă să descompună un sunet complex în componentele sale armonice.

Muzica

Deosebirea dintre sunet și zgomot a fost deja ilustrată de curbele de presiune acustică. Un ton muzical simplu este creat printr-o oscilație periodică de o anumită frecvență. Sunetele complexe reprezintă combinații de tonuri pure.

O orchestră reproduce aproape toate frecvențele audibile. Gama de sunete a pianului cuprinde tonuri cu frecvențe de la aproximativ 25 pînă la 4 000 Hz.

Nu toate combinațiile de sunete produc plăcere celui ce ascultă. O senzație plăcută dau acele sunete ale căror frecvențe de oscilație se află unele față de altele în rapoarte simple. Dacă frecvențele sonore se găsesc în raportul 2: 1, se spune că avem o octavă, dacă raportul este 5: 4, avem o terță mare, raportul 4: 3 dă o cuartă, iar 3: 2 o cvintă. Senzația de armonie dispare dacă frecvența oscilațiilor sonore nu poate fi reprezentată prin astfel de raporturi simple. Atunci muzicanții spun că este o disonanță. Urechea percepe bine combinațiile de diferite tonuri. De aceea chiar oamenii cu auz mediocru sînt sensibili la disonanțe.

Cu ajutorul instrumentelor fără clape, de tipul viorii, un muzicant poate scoate orice ton și poate produce orice combinație de tonuri.

La un instrument cum este pianul, lucrurile stau altfel. Coardele pianului sînt acordate pe anumite frecvențe, iar lovirea clapelor nu poate schimba tonalitatea sunetului. Claviatura pianului cuprinde șapte octave întregi. „Do“ de jos dă un ton cu o frecvență de 32,64 Hz, iar „do“ de sus, un ton cu o frecvență de $32{,}64 \cdot 2^7 \approx 4\,178$ Hz. Problema este cum să se împartă octavele, adică ce tonuri intermediare trebuie să se introducă pentru a satisface următoarele două condiții. În primul rînd frecvențele trebuie să se găsească în raporturi cît mai simple cu putință. În al doilea rînd, trebuie să se împartă octava în intervale (rapoarte între frecvențe) egale, deoarece numai în acest caz se poate cînta aceeași melodie începînd cu orice notă a „octavei“ (aceeași melodie în alt ton). Ele se îndeplinesc în mod aproximativ cînd se utilizează așa-numita scară temperată.

Să vedem ce se întîmplă dacă se împarte octava în 12 intervale egale. Fiecare din aceste intervale va fi egal cu $2^{\frac{1}{12}} = 1{,}059$. Aceasta înseamnă că raportul dintre două tonuri vecine va fi egal cu acest număr.

Să scriem acum următoarele valori:

1) $2^{\frac{1}{12}} = 1{,}059$,
2) $2^{\frac{2}{12}} = 1{,}122$,
3) $2^{\frac{3}{12}} = 1{,}189$,
4) $2^{\frac{4}{12}} = 1{,}260$,
5) $2^{\frac{5}{12}} = 1{,}335$,
6) $2^{\frac{6}{12}} = 1{,}414$,
7) $2^{\frac{7}{12}} = 1{,}498$,
8) $2^{\frac{8}{12}} = 1{,}587$,
9) $2^{\frac{9}{12}} = 1{,}682$,
10) $2^{\frac{10}{12}} = 1{,}782$,
11) $2^{\frac{11}{12}} = 1{,}888$,
12) $2^{\frac{12}{12}} = 2$.

Spre deplina sa satisfacție, muzicantul observă că aritmetica rezolvă problema: octava este împărțită în intervale riguros egale

și, în același timp, raporturile dintre multe tonuri sînt foarte apropiate de raporturile unor numere prime. Aici găsim și cvinta (7), și cvarta (5), și terța mărită (4), deoarece $1{,}498 \approx \frac{3}{2}$; $1{,}260 \approx \frac{5}{4}$, iar $1{,}335 \approx \frac{4}{3}$. Situația este excelentă și în celelalte cazuri în care diferența nu trece de 1%, și anume: $1{,}414 \approx \frac{7}{2}$; $1{,}122 \approx \frac{9}{8}$; $1{,}587 \approx \frac{8}{5}$; $1{,}682 \approx \frac{5}{3}$; $1{,}888 \approx \frac{17}{9}$; numai primul interval $1{,}059 \approx \frac{18}{17}$ dă o disonanță evidentă.

Micile abateri de la scara pură (adică aceea în care raporturile dintre frecvențe sînt cu precizie egale cu raportul unor numere întregi) sînt prea puțin perceptibile pentru auz, așa că scara temperată a pianului s-a răspîndit foarte mult.

Timbrul sunetului

Ați văzut cum se acordează o chitară: se întinde coarda pe cui. Dacă s-a ales o lungime și o întindere a coardei, aceasta va emite un ton perfect determinat cînd este atinsă.

Dacă însă ascultați sunetul coardei cînd o atingeți în diferite puncte ale ei — la mijloc, la un sfert de la punctul de fixare, în orice alt loc, veți auzi sunete puțin diferite. Tonul este unul și același, dar coloritul sunetului sau, cum spun muzicienii, tim-

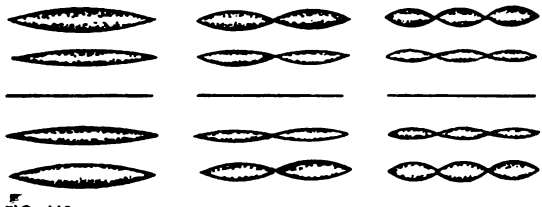


FIG. 119

brul sunetului, este diferit. Despre ce este vorba aici și ce dă uneia și aceleiași tonalități un colorit diferit?

Adevărul este că una și aceeași coardă poate oscila nu într-un singur fel, ci în foarte multe feluri. Cîteva tipuri de oscilații posibile ale unei coarde sînt reprezentate în fig. 119. Oscilația

cu frecvența cea mai mică (ea se mai numește și frecvență fundamentală) este reprezentată în schema din stînga. Punctele de la extremități sînt fixe, iar punctul din mijloc efectuează oscilații cu amplitudine maximă. Pentru ca cititorul să-și imagineze clar oscilația întregii coarde, ca un întreg, în figură sînt reprezentate mai multe poziții succesive ale acesteia. Există și o poziție în care toată coarda este întinsă sub formă de dreaptă: toate punctele coardei trec simultan prin poziția de echilibru. Pe schema din mijloc este arătată o oscilație care se produce cu o frecvență aproximativ dublă. În acest caz, pe lîngă punctele fixe de la extremități, se găsește în repaus și punctul de la mijlocul coardei. Un astfel de punct în repaus se numește nod al oscilației. Oscilații cu amplitudine maximă efectuează punctele situate la 1/4 din distanța de la capetele coardei. Despre aceste puncte se spune că în ele se găsesc umflăturile oscilației. Atît în acest caz, cît și în toate celelalte, toate punctele coardei trec simultan prin zero.

Schema din stînga nu mai are nevoie de comentarii; în ea este reprezentată oscilația cu o frecvență aproximativ triplă — două noduri și trei umflături sînt caracteristice pentru această oscilație.

În funcție de excitația la care e supusă, o coardă poate oscila cu frecvențe mai mari. Toate aceste frecvențe, cum se spune, fac parte din oscilațiile proprii ale coardei.

Frecvențele proprii, în afară de cea fundamentală, ale unei coarde dau sunete care se numesc armonice superioare. Sunetul coardei se compune din sunetul tonului fundamental (sau armonica fundamentală) și din cel al armonicelor superioare. Atingînd o coardă în diferite puncte, producem diferite spectre de oscilații. Astfel, ciupind coarda la mijloc se obține tonul fundamental foarte puternic. Ciupind-o la o distanță de 1/4, va răsuna intens armonica cu frecvența dublă. Într-un caz arbitrar, spectrul oscilației va conține numeroase armonice superioare cu diferite intensități. Aceste armonice superioare sînt cele care dau coloritul (timbrul) sunetului.

Acum înțelegem și de ce același ton cîntat de diferite voci sau dat de pian sau de vioară sună diferit. Avem de-a face cu sunete cu același ton, dar constînd din armonice diferite, ceea ce dă sunetelor coloritul lor specific. Comparați, de exemplu, cele două curbe din fig. 120, a și b. Ele reprezintă înregistrarea aceluiași ton emis de un clarinet și de un pian. Vedem că nici unul din aceste două sunete nu se prezintă sub formă de oscilații sinusoidale simple. Frecvența fundamentală a oscilațiilor este aceeași în ambele cazuri și de aceea și tonurile sînt identice. Dar

configurația curbelor este diferită. Acest lucru arată ce înseamnă timbrul.

Însușirea urechii de a distinge nota „do" a pianului de aceeași notă a clarinetului se bazează tot pe descompunerea sunetului în componentele sale armonice, adică în armonica fundamentală și armonicele superioare.

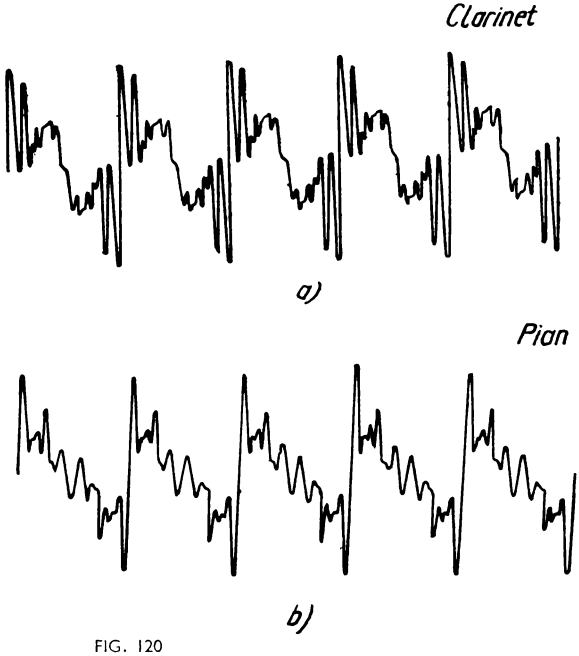


FIG. 120

Clarinetul face parte din marea clasă a instrumentelor de suflat. Ce fel de oscilații sînt însă acelea care dau în aceste cazuri sunete cu o anumită tonalitate și cu timbruri diferite? Ele sînt oscilații ale unor coloane de aer.

Muzicantul care cîntă la un instrument de suflat acționează cu respirația sa nu ca un cîntăreț vocal, ci ca un chitarist cu mîna sa. Muzicantul doar pune în mișcare de oscilație coloana de aer din tubul instrumentului. În ce privește însă tonalitatea și timbrul, ele sînt stabilite de muzicant prin varierea lungimii coloanei de aer. În funcție de lungimea coloanei de aer, aerul care se găsește în tub intră în oscilație, ca și o coardă, cu anumite frecvențe.

Orchestra în mișcare

Vă odihniți sub un copac pe marginea șoselei și vă trece prin față un autocamion cu o orchestră cîntînd. Sau să luăm cazul contrar: să presupunem că treceți cu mașina printr-un sat în care este în toi o petrecere țărănească. În ambele cazuri cîteva fraze muzicale trec pe lîngă urechea ascultătorului. Oare sunetul nu se modifică cînd îl auzim „din mers"?

Ne vom ocupa mai întîi de impresiile muzicale ale șoferului care se apropie de orchestră. Dacă mașina se deplasează în întîmpinarea undei sonore, numărul de comprimări ale aerului care ajung la urechea șoferului în unitatea de timp va fi, desigur, mai mare decît dacă mașina ar sta pe loc.

Lucrurile stau absolut la fel ca și cînd în întîmpinarea șoferului ar veni, în loc de o undă sonoră, un șir de sportivi care aleargă. Pentru ca analogia să fie completă, trebuie să presupunem că alergătorii păstrează între ei aceeași distanță (asta ar fi lungimea de undă) și că aleargă cu viteză constantă.

Desigur că numărul de alergători care trec în fugă pe secundă pe lîngă automobilul pe care îl întîlnesc va fi mai mare dacă mașina este în mișcare. Viteza relativă a mașinii și a alergătorilor este egală cu $c + u$. De cîte ori a crescut această viteză relativă, de atîtea ori crește și numărul de sportivi care trec pe lîngă automobil în unitatea de timp.

Așadar, raportul dintre frecvența ν_m măsurată de un observator în mișcare și frecvența ν măsurată de un observator în repaus este egală cu raportul vitezelor:

$$\frac{\nu_m}{\nu} = \frac{c + u}{c},$$

sau, sub altă formă,

$$\nu_m = \nu \left(1 + \frac{u}{c}\right).$$

După cum arată această formulă, cînd mașina se apropie de orchestră, frecvența sunetului crește. Dacă mașina merge cu viteza de 70 km/h, frecvența sunetului crește cu 6%.

Dacă mașina se depărtează de orchestră, trebuie să se schimbe semnul vitezei u. La această viteză relativă, frecvența sunetului scade. Așadar, cînd mașina trece pe lîngă orchestră, frecvența sunetului variază cu $2 \times 6 = 12\%$. Frecvența de 100 Hz va fi percepută ca o frecvență de 106 sau 94 Hz, iar aceasta reprezintă

o variație aproximativ de un semiton a frecvenței. Chiar un ascultător de muzică nu prea pregătit va simți această variație.

Dacă $u = -c$, adică ascultătorul se depărtează de sursa sonoră cu viteza sunetului, atunci $\nu_m = 0$, adică, în cuvinte mai simple, sunetul nu se va mai auzi de loc. Dacă viteza cu care se depărtează ascultătorul este mai mare decît viteza sunetului, sunetul începe să se audă din nou, iar frecvența lui va crește pe măsură ce crește viteza ascultătorului. În formulă apare semnul minus. El nu are o importanță directă, deoarece frecvența este o mărime pozitivă. Dar fenomenul însuși capătă un caracter oarecum contrar cînd apare semnul minus. În cazul depărtării ascultătorului cu o viteză mai mare decît viteza sunetului, el întrece tot timpul sunetul mai întîi, pe acela care a pornit la drum, să zicem, acum o secundă, apoi pe acela care a plecat acum două secunde, după aceea urechea călătorului ajunge din urmă sunetul care s-a lansat în spațiu acum trei, patru etc. secunde. Așadar, toate sunetele se vor auzi în ordine inversă.

Să ne întoarcem la formula generală a variației vitezei. Se poate folosi aceeași formulă și în cazul orchestrei în mișcare? Fără îndoială că da, cu condiția să fie utilizată corect.

În formula pe care am dedus-o pentru un observator în mișcare figurează două frecvențe — frecvența sunetului în mediu care, natural, coincide cu frecvența sunetului perceput de un ascultător în repaus sau emis de un instrument fix, și frecvența ν_m a sunetului, egală cu numărul de oscilații transmise pe secundă aerului de un corp în mișcare sau primite de la aer de un corp în mișcare.

Așadar, dacă în primul exemplu frecvența emisă și cea percepută sînt, respectiv frecvența ν a mediului și frecvența ν_m în mișcare, în exemplul al doilea, invers, frecvența percepută este ν, iar cea emisă este ν_m.

Pentru un observator în mișcare, $\nu_{obs} = \nu_{real}\left(1 + \frac{u}{c}\right)$.

Pentru o sursă de sunet în mișcare, $\nu_{obs} = \frac{\nu_{real}}{1 + \frac{u}{c}}$.

Trebuie totodată să se aibă în vedere că viteza pozitivă în primul caz corespunde apropierii, iar în cel de-al doilea — depărtării sursei de observator.

Este ușor de văzut că ambele formule dau o alură asemănătoare a variației frecvenței în funcție de viteză. Dacă, de exemplu

$\frac{u}{c} = 0{,}2$ atunci în cazul mișcării observatorului în întîmpinarea sursei, frecvența crește cu 20%, iar în cazul mișcării sursei în întîmpinarea observatorului, frecvența crește cu 25%.

Am presupus în mod tacit pînă acum că orchestra și ascultătorul se deplasează de-a lungul unei direcții care corespunde cu direcția de propagare a sunetului. Ce se va schimba, dacă ascultătorul nu se deplasează în direcția orchestrei care cîntă, ci trece pe lîngă ea? Este clar că are importanță numai componenta vitezei automobilului dirijată pe linia de propagare a sunetului. Deplasarea observatorului pe frontul undei sonore, adică perpendicular pe direcția de propagare a sunetului, nu joacă nici un rol.

Aceleași considerații se referă și la mișcarea orchestrei. În acest caz, cînd se aplică formula, trebuie să se aibă în vedere că viteza care intră în formulă trebuie să fie luată nu în momentul percepерii, ci în momentul emiterii undei sonore.

Dacă atît observatorul cît și sursa sonoră se găsesc în mișcare în raport cu aerul, formulele se contopesc. Frecvența sunetului perceput va fi

$$\nu_{obs} = \frac{1 + \frac{u}{c}}{1 + \frac{v}{c}} \cdot \nu_{real},$$

în care u este viteza observatorului, iar v este viteza sursei sonore.

Variația frecvenței sunetului în cazul mișcării observatorului sau a sursei sonore se numește efect Doppler.

Energia sunetului

Toate particulele de aer care înconjură un corp ce emite sunete se găsesc în stare de oscilație. După cum am explicat în capitolul V, un punct material care oscilează după legea sinusului posedă o energie totală anumită și invariabilă.

Cînd punctul care oscilează trece prin poziția de echilibru, viteza sa este maximă. Întrucît deplasarea punctului, în acest moment, față de poziția de echilibru, este egală cu zero, toată energia se reduce la energia cinetică

$$E_c = \frac{mv^2_{max}}{2}.$$

Prin urmare, după cum am mai explicat și la pag. 106, energia totală este proporțională cu pătratul valorii maxime (de amplitudine) a vitezei oscilației.

Acest lucru este adevărat și pentru particulele de aer care oscilează într-o undă sonoră. O particulă de aer însă este ceva nedeterminat. De aceea, se raportează energia sunetului la unitatea de volum de aer. Această mărime se poate numi densitate de energie sonoră.

Întrucît masa unității de volum este densitatea ρ, densitatea de energie sonoră va fi

$$w = \frac{\rho v^2_{max}}{2}.$$

Am vorbit mai înainte despre încă o mărime fizică importantă care efectuează oscilații după legea sinusului cu aceeași frecvență ca și viteza. Este vorba de presiunea acustică sau de excesul de presiune. Întrucît aceste mărimi sînt proporționale, se poate spune că densitatea de energie este proporțională cu pătratul valorii maxime (de amplitudine) a presiunii acustice.

Mai departe sînt date valorile amplitudinilor oscilației sonore pentru o conversație cu voce tare. Amplitudinea vitezei este egală cu 0,02 cm/s. 1 cm^3 aer cîntărește circa 0,001 g. Așadar, densitatea de energie este

$$\frac{1}{2} \cdot 10^{-3} \cdot (0{,}02)^2 \ \frac{erg}{cm^3} = 2 \cdot 10^{-7} \ \frac{erg}{cm^3}.$$

Să presupunem că oscilează o sursă sonoră. Ea emite energie sonoră în aerul înconjurător. Energia parcă ar „curge" de la corpul care emite sunete. Prin fiecare suprafață situată perpendicular pe direcția de propagare a sunetului se scurge într-o secundă o anumită cantitate de energie. Această mărime se numește fluxul de energie care trece prin acea suprafață. Dacă, în afară de aceasta, se ia unitatea de suprafață (de exemplu 1 cm^2), cantitatea de energie care se scurge prin unitatea de suprafață, se numește intensitatea undei sonore.

Nu este greu de văzut că intensitatea I a unui sunet este egală cu produsul dintre densitatea W de energie și viteza c a sunetului. Să ne închipuim un mic cilindru cu înălțimea de 1 cm și cu suprafața bazei de 1 cm^2, ale cărui generatoare sînt paralele cu direcția de propagare. Energia W pe care o conține un astfel de cilindru îl va părăsi complet după un timp egal cu $1/c$. Așadar, prin unitatea de suprafață va trece în unitatea de timp o energie $w/\frac{1}{c}$, adică wc. Energia se deplasează parcă cu viteza sunetului.

În cazul conversației cu voce tare, intensitatea sunetului în apropierea vorbitorilor va fi aproximativ egală (ne servim de valoarea obținută mai înainte) cu $2 \cdot 10^{-7} \cdot 3 \cdot 10^4 = 0{,}006 \frac{\text{erg}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}}$.

Atenuarea sunetului cînd distanța crește

Unda sonoră se propagă de la instrumentul care produce sunete, firește, în toate direcțiile.

Să ducem cu gîndul în jurul sursei de curent două sfere de rază diferită. Bineînțeles că energia sonoră care trece prin prima suprafață sferică va trece și prin a doua suprafață sferică. Dacă se notează cu I intensitatea sunetului, energia undei care trece printr-o sferă se poate scrie astfel: $I \cdot 4\pi r^2$, deoarece $4\pi r^2$ este suprafața unei sfere de rază r. Dacă nu se pierde energie în drumul de la prima sferă la a doua, atunci $I_1 \cdot 4 \cdot r_1^2 = I_2 \cdot 4 \cdot r_2^2$.

Așadar, intensitățile I_1 și I_2 ale undei la distanțele r_1 și respectiv r_2 de la sursa sonoră sînt una față de alta invers proporționale cu pătratele distanțelor. Deoarece intensitatea sunetului este proporțională cu densitatea de energie, atunci intensitatea, ca și densitatea de energie, este proporțională cu pătratul amplitudinii oscilației. De aici rezultă că amplitudinile undei la distanțele r_1 și respectiv r_2 de la sursa sonoră sînt una față de alta invers proporționale cu distanța. Intensitatea sunetului scade invers proporțional cu pătratul distanței de la sursă, iar amplitudinea este invers proporțională cu distanța la puterea întîi. De fapt însă sunetul se atenuează ceva mai repede, deoarece o parte din energie este absorbită pe drum. Această atenuare are loc din cauză că, în timpul oscilației particulelor mediului, o parte oarecare din energie se va cheltui pentru învingerea frecării vîscoase. Aceste pierderi sînt însă relativ mici, iar cauza principală pentru care la distanță mare auzim mai prost decît din apropiere este legea proporționalității inverse cu pătratul distanței.

Sunet puternic și sunet slab

Organele de simț ale omului sînt în multe privințe mai perfecte decît cele mai bune instrumente. Această constatare este vala-

bilă și pentru ureche. Putem percepe sub formă de sunet unde cu intensitate de la 10^{-9} erg/cm^2·s pînă la 10^4 unități de acestea de intensitate. Așadar, cel mai puternic sunet diferă de cel mai slab de zece trilioane de ori.

Care este sunetul cel mai slab pe care-l poate percepe omul? Un foșnet de-abia audibil produce asupra timpanului o presiune de $2 \cdot 10^{-4}$ dyn/cm^2, adică de aproximativ două zecimi de milionimi dintr-un gram. Cele mai bune microbalanțe nu au sensibilitatea urechii omului.

Dacă sunetele posedă o energie mai mare de 10^4 erg/cm^2·s, omul nu mai aude un sunet, ci simte o senzație dureroasă. Presiunea pe timpan atinge în acest caz 0,2 gf/cm^2. Urechea percepe în mod dureros tocmai unda de presiune, adică șocurile alternative de compresiune și depresiune. Dacă însă presiunea constantă a aerului crește cu cantitatea de 0,2 gf indicată mai înainte, urechea, bineînțeles, „nu observă" acest lucru. Presiunea atmosferică normală, egală aproximativ cu 1 kgf/cm^2, se mărește cu mai mult de 0,2 gf atunci cînd coborîți de la etajul al treilea în stradă.

Energia undei care poartă un sunet puternic este de un număr enorm de ori mai mare decît energia undei care aduce la ureche o șoaptă sau un foșnet. De aceea, în practică este foarte incomod să se evalueze cît de puternic este un sunet prin valoarea energiei sale. Închipuiți-vă că un colaborator, care caută mijloace pentru a combate zgomotul străzii, trebuie să prezinte un referat la sesiunea sfatului popular al orașului și să arate cu cît se micșorează zgomotul dacă se înlocuiește circulația tramvaielor cu troleibuze sau autobuze, dacă se interzice șoferilor folosirea claxonului pe stradă ș.a.m.d. Pentru ca situația să fie prezentată sugestiv, trebuie să se recurgă la planșe. Așa cum se obișnuiește cînd se construiesc diagramele de diferite feluri, se pot desena pe aceste planșe niște coloane a căror înălțime să reprezinte gradul de zgomot. Dacă însă se definește tăria unui sunet prin mărimea energiei, apare o dificultate de neînvins: liniștea și zgomotul diferă atît de mult unul de altul încît este mult mai greu să se reprezinte ambele pe aceeași diagramă la aceeași scară decît să se deseneze pe aceeași planșă un elefant și o muscă în mărime naturală.

În astfel de cazuri, în fizică se recurge la așa-numita scară logaritmică.

Dacă o mărime oarecare crește de 10, 100, 1 000 ș.a.m.d. de ori, logaritmul ei se mărește de 1, de 2, de 3 ș.a.m.d. ori. Așadar, servindu-ne nu de energia undei sonore, ci de logaritmul acestei mărimi, se poate întotdeauna face „să încapă" pe aceeași planșă

reprezentarea zgomotului unui motor de avion și cea a țiuitului unui țînțar.

Scara tăriei sunetelor se alcătuiește în modul următor. Se alege în mod convențional ca nivel de tărie zero a sunetului, nivelul de tărie egal cu 10^{-9} erg/cm^2·s. Sunetele de această tărie nu pot fi auzite nici de un om cu auzul cel mai fin. Apoi se determină de cîte ori energia E a sunetului care ne interesează este mai mare decît valoarea E_0 a acestui nivel inițial, adică se găsește raportul E/E_0.

Ca unitate de măsură a tăriei sunetelor se ia tocmai logaritmul zecimal al acestui raport. Unitatea de tărie a sunetului poartă numele de bel; de altfel, de obicei se folosește a zecea parte dintr-un bel, denumită decibel (dB). Tăria sunetului în decibeli este egală cu $10 \lg \frac{E}{E_0}$.

Ne putem da seama de ce înseamnă un decibel din următorul tabel, care indică valorile tăriei diferitelor sunete la o distanță de cîțiva metri de sursa sunetului:

Foșnetul frunzelor	10 dB
Strada liniștită	30 dB
Automobil în mișcare	50 dB
Conversație cu voce tare	70 dB
Stradă zgomotoasă	90 dB
Avion	100 dB

Tabelele de logaritmi permit să ne facem o idee clară despre un decibel. Astfel, mărirea tăriei unui sunet cu 1 dB corespunde creșterii intensității sunetului de $10^{0,1} = 1{,}26$ de ori, adică cu 26%. Mărirea intensității sunetului de două ori corespunde unei variații a tăriei sale cu 3 dB, mărirea de cinci ori corespunde la 7 dB, iar mărirea de 10 ori corespunde la 10 dB.

Dacă distanța de la sursa de sunet se mărește de două ori, intensitatea sunetului scade de patru ori, iar tăria sunetului scade cu 6 dB. Să presupunem că ne găsim la distanța de 1 m de o coardă care vibrează și că ne-am depărtat la distanța de 10 m. Intensitatea undei care ajunge la urechea noastră scade de 100 de ori, iar tăria sunetului se micșorează cu 20 dB.

Mai înainte am vorbit de caracterul limitat al intervalului de frecvențe audibile. Completînd aceste informații cu cunoștințele noastre despre sensibilitatea urechii la un sunet slab și la unul

tare, putem s-o reprezentăm sub formă de diagramă a audibilității tipice pentru un om normal (fig. 121). Pe axa orizontală a acestei diagrame s-a luat frecvența sunetului, iar pe axa verticală, energia sunetului. În figură sînt indicate pragul de audibi-

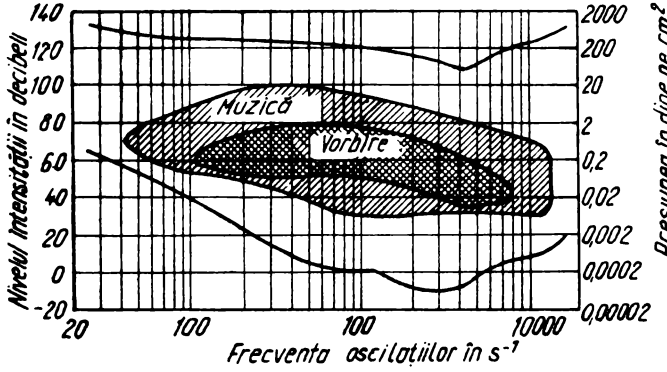


FIG. 121

litate și pragul de senzație dureroasă. Domeniul audibil se găsește în interiorul domeniului sunetelor.

Sunete neaudibile

O frecvență a sunetului de 20 000 Hz este limita peste care urechea omenească nu mai percepe oscilațiile mecanice ale mediului. Prin diferite mijloace se pot produce oscilații cu o frecvență mai înaltă, pe care omul nu le aude, dar instrumentele le pot înregistra. De altfel, nu numai instrumentele recepționează astfel de oscilații. Multe animale — liliecii, albinele, balenele, delfinii — pot percepe oscilații mecanice cu o frecvență pînă la 100 000 Hz.

În prezent se pot obține oscilații cu frecvențe pînă la un miliard de hertzi. Aceste oscilații, deși nu sînt audibile, se numesc ultrasunete, pentru a se sublinia înrudirea lor cu sunetele.

Ultrasunetele cu frecvențele cele mai mari se obțin cu ajutorul lamelor de cuarț. Ele au următoarea proprietate interesantă: dacă se aplică unei astfel de lame o tensiune electrică continuă, ea se comprimă sau se întinde. Dacă însă se aplică lamei o tensiune electrică alternativă, ea se va comprima și dilata alternativ, adică va începe să oscileze.

În modul acesta se pot produce fluxuri puternice de ultrasunete cu o intensitate de cîteva mii de jouli pe centimetru pătrat și pe secundă. Este interesant de comparat această valoare cu intensitatea sunetului audibil. În imediata apropiere a unui tun care trage, ea atinge doar 0,005 J/cm^2 într-o secundă.

Energia ultrasunetelor este atît de mare încît poate fi simțită. Dacă băgați mîna într-un lichid prin care se propagă oscilații ultrasonore, simțiți o durere intensă.

Ultrasunetele sînt capabile să producă în substanțe transformări interesante și de aceea au o largă întrebuințare în cele mai diferite domenii. Una din aceste întrebuințări este sfărîmarea substanțelor. Dacă se introduc bucățele de plumb sau de cupru într-un lichid și dacă se expune acest lichid acțiunii ultrasunetelor, metalul se sfărîmă și formează o suspensie foarte fină. Fărîmițarea se produce în cazurile în care dimensiunile particulelor sînt mai mari decît lungimea de undă.

Dacă particulele de substanță sînt mici, influența ultrasunetelor este contrară. Acționînd cu ajutorul ultrasunetelor într-o încăpere plină de fum, se poate curăța repede și complet aerul din ea. În adevăr, sub influența ultrasunetelor, particulele de fum se aglomerează (acest fenomen se numește coagulare), devin de zeci și sute de ori mai grele și se depun pe podea.

Deosebit de interesantă este acțiunea biologică a ultrasunetelor. Multe celule, în special filiforme, se distrug sub influența ultrasunetelor. Bacteriile mor sau suferă modificări esențiale. Cu ultrasunete se poate steriliza laptele.

Un domeniu interesant de aplicație a ultrasunetelor este detectarea fisurilor și a altor defecte în piesele metalice turnate de grosime enormă (pînă la 10 m). Dacă o undă ultrasonoră întîlnește în calea ei o fisură sau o suflură, ea nu va trece mai departe, ci se va reflecta, întorcîndu-se înapoi. Această undă reflectată este captată de un instrument și, după timpul care i-a trebuit ultrasunetului pentru ca să ajungă la defect și să se întoarcă, se determină adîncimea la care se găsește defectul.

Liliecii folosesc ultrasunetele într-un mod foarte interesant. Pentru ca liliacul să poată trăi în întuneric complet, natura l-a înzestrat cu un aparat radar extraordinar de perfecționat. El funcționează pe baza frecvențelor ultrasonore. În timpul zborului, liliacul emite semnale neaudibile pentru urechea omului, cu o frecvență de 25 000—150 000 Hz. Fiecare semnal durează aproximativ 10—15 miimi de secundă. Semnalul ultrasonor trimis de liliac într-o anumită direcție față de corpul lui se lovește de obstacol, este reflectat de acesta și se întoarce înapoi. Organele

auditive ale liliacului sînt, de asemenea, neobișnuit de dezvoltate — liliacul poate să audă semnalul reflectat chiar dacă este de două mii de ori mai slab decît semnalul inițial. Ceva mai mult, liliacul poate deosebi semnalul său propriu reflectat dintre zgomotele străine, chiar dacă aceste zgomote sînt de mii de ori mai puternice decît ecoul semnalului emis de el. După timpul care trece din momentul cînd a emis semnalul pînă la întoarcerea lui, liliacul stabilește (bineînțeles, instinctiv) la ce distanță se găsește obstacolul.

Cum ocolește sunetul obstacolele

Să presupunem că ne găsim în fundul unei camere de la etajul întîi și vorbim. Fereastra este deschisă, iar afară se află persoana cu care vorbim. Va auzi ea? Da, dacă vom vorbi destul de tare; totuși ea va auzi mult mai slab decît în cazul în care s-ar urca pe o scară și va sta în dreptul ferestrei. Undele sonore, ieșind pe fereastră, se revarsă parcă în toate direcțiile, dar cam greu. De aici se vede că undele sonore se propagă cel mai bine în linie dreaptă, dar în oarecare măsură deviază și în lături. Este oare acest lucru adevărat pentru orice unde sonore? Ei bine, nu!

Un rol esențial joacă raportul dintre lungimea de undă și dimensiunile orificiului. Dacă lungimea de undă este mare în comparație cu aceste dimensiuni, undele, ieșind din orificiu, „se revarsă" în toate direcțiile, ca și cum orificiul ar fi sursa sunetului. Dimpotrivă, dacă lungimea de undă este mult mai mică decît dimensiunile orificiului, sunetul se propagă radial și acolo unde linia dreaptă dusă de la sursa de sunet la observator întîlnește un obstacol (în exemplul nostru, un perete), se produce o „umbră", iar sunetul aproape nu se mai aude.

În exemplul de mai înainte, la o frecvență medie de 1 000 Hz a vocii omenești corespunde o lungime de undă de 30 cm. De aceea, astfel de unde, trecînd prin golul de un metru al unei ferestre, se propagă de preferință înainte, dar deviază sensibil și în lături.

Este foarte greu de figurat pe un desen modul în care undele sonore ocolesc obstacolele.

Mult mai simplu este de arătat cum se comportă într-o situație similară undele superficiale (sau de suprafață) pe apă. Despre aceste unde vom vorbi ceva mai tîrziu. Proprietățile lor sînt de un gen oarecum special. În ce privește însă regulile ocolirii obsta-

colelor de către unde, ele sînt aceleași pentru undele de apă, cît și pentru undele sonore care se propagă prin aer.

În fig. 122 și 123 este reprezentată trecerea undelor superficiale ale apei, de diferite lungimi, prin același orificiu. În fig. 122, lungimea de undă este mult mai mare decît dimensiunile orificiului. În acest caz, unda umple aproape complet zona de dincolo de ecran. În fig. 123 este reprezentată o undă cu o lungime de undă foarte mică. Acum propagarea undei se face radial. Unda nu pătrunde aproape de loc în zona de umbră geometrică.

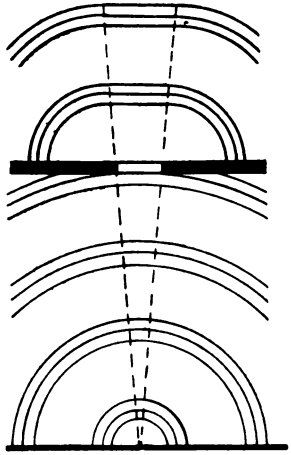


FIG. 122

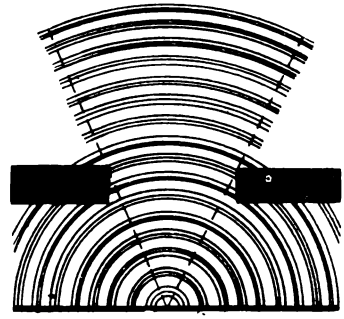


FIG. 123

Așadar, cînd lungimea de undă a unui sunet este mult mai mică decît dimensiunile obiectelor de care se lovesc, sunetul se comportă absolut ca și cum n-ar fi vorba de oscilații ale aerului, ci de un flux de particule care se deplasează în aer. Deosebirea față de particulele obișnuite constă în special în faptul că acestea se pot mișca cu viteze oarecare, pe cînd sunetul se propagă întotdeauna cu aceeași viteză.

Natura ondulatorie a sunetului se manifestă prin faptul că deviază totuși întotdeauna într-o oarecare măsură de la propagarea rectilinie. După cum am mai spus, această deviere este cu atît mai mică cu cît lungimea de undă este mai mică, dar ea există întotdeauna și, în principiu, poate fi măsurată. Această deviere se numește difracția sunetului. Existența difracției ar putea servi ca dovadă a faptului că sunetul este de natură ondulatorie, dacă n-am ști acest lucru direct (după modul cum se produc sunetele). Cînd se studiază difracția, s-ar putea măsura lungimea de undă a sunetelor, dacă iarăși n-am cunoaște-o, după frecvența oscilațiilor sursei de sunete.

Reflexia sunetului

În subcapitolul de față vom presupune că lungimea de undă a sunetului este suficient de mică și, prin urmare, sunetul se propagă radial. Ce se întîmplă cînd o astfel de undă sonoră din aer cade pe o suprafață solidă? Este clar că în acest caz sunetul se reflectă. Dar în ce direcție se reflectă?

Analogia propagării sunetului cu mișcarea particulelor materiale arată că această reflexie trebuie să aibă loc ca și reflexia unei mingi care se lovește de un perete, cu singura diferență că, datorită proceselor de frecare, după lovire, viteza mingii se micșorează, pe cînd viteza de propagare a sunetului, care depinde numai de proprietățile mediului aerian, firește, nu variază. Aici frecarea nu se manifestă prin micșorarea vitezei sunetului, ci prin faptul că, cu prilejul reflexiei, o parte din energia undelor sonore se transformă în căldură.

Întrucît reflexia sunetului nu diferă, în principiu, de ciocnirea elastică, legea reflexiei sunetului se poate formula în modul următor: unghiul de incidență al razei sonore, adică unghiul format de rază și de normală (adică de perpendiculara) pe suprafața pe care cade raza este egal cu unghiul de reflexie, raza reflectată găsindu-se în planul care trece prin raza incidentă și prin normala la suprafață. Acest plan se numește planul de incidență al razei sonore.

Așadar, dacă vrem să aflăm direcția de propagare a undei reflectate, trebuie să procedăm în modul următor. În punctul de incidență al undei ducem o normală, măsurăm unghiul de incidență și construim planul de incidență. Apoi luăm în acest plan, de cealaltă parte a normalei, un unghi egal cu unghiul de incidență; dreapta obținută reprezintă direcția de propagare a undei reflectate (fig. 124).

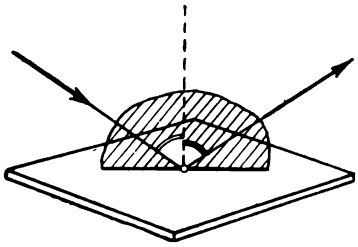


FIG. 124

Vom rezolva acum o problemă delicată.

După cum știm, sunetul se propagă de la sursă în toate direcțiile și într-un punct depărtat ajunge numai o mică fracțiune din energia sonoră. Cum trebuie să se prezinte suprafața de reflexie pentru ca să se adune sunetul din nou într-un singur punct? Forma suprafeței reflectante trebuie să fie astfel, încît undele care cad pe ea dintr-un

punct (sursa sonoră) sub diferite unghiuri să se reflecte adunîndu-se din nou într-un punct.

Știm deja ce este o elipsă. La pag. 154 s-a vorbit despre această curbă remarcabilă, care are particularitatea că distanța de la un focar al ei pînă la un punct oarecare de pe curbă, plus distanța

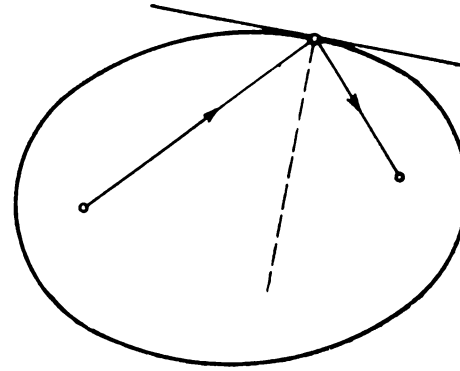


FIG. 125

de la celălalt focar pînă la același punct este constantă pentru toate punctele elipsei. Închipuiți-vă că elipsa se rotește în jurul diametrului cel mare. Curba descrie în rotirea ei o suprafață care se numește elipsoid. Forma elipsoidului seamănă cu un ou.

Elipsa are următoarea particularitate geometrică (fig. 125). Dacă se desenează un unghi cu vîrful într-unul din punctele elipsei și cu laturile trecînd prin focarele ei, bisectoarea acestui unghi este normală la elipsă (adică perpendiculară pe tangenta la elipsă în acel punct). Așadar, dacă o undă sonoră pleacă din unul din focarele elipsoidului, după ce se reflectă de suprafața elipsei, ajunge în celălalt focar. Așa se vor comporta toate undele sonore și deci tot fluxul sonor care a plecat dintr-un focar se va concentra în celălalt focar.

Această proprietate a suprafețelor curbe de acest tip era cunoscută încă din antichitate. În evul mediu, în timpul Inchiziției, cînd controlul asupra gîndurilor fiecărui om devenise unul din principalele aspecte ale activității statului, pentru a se asculta conversațiile cetățenilor se foloseau suprafețe boltite. Doi oameni, care-și dezvăluiau unul altuia cu glas potolit gîndurile lor, nu bănuiau că, datorită plafonului boltit, în celălalt colț al cîrciumioarei un călugăr dormitînd auzea aproape tot așa de bine ca ei înșiși fiecare cuvînt al convorbirii.

Este greu de construit o suprafață elipsoidală, dar mici porțiuni de suprafață sferică diferă prea puțin ca formă de porțiunile de suprafață elipsoidală.

Dacă în fața unei astfel de „oglinzi" sferice se pune o sursă care emite sunete, undele sonore care pornesc de la ea se vor aduna din nou în celălalt cîmp de reflexie, ce-i drept, nu într-un singur punct ca la un elipsoid adevărat, ci într-un mic volum al spațiului.

Se poate face următoarea experiență chiar cu o farfurie adîncă obișnuită. Dacă se pune în apropiere de o astfel de farfurie un ceasornic, a cărui bătaie este practic imposibil de auzit cu urechea la o distanță de ordinul unui metru, se poate găsi un punct destul de depărtat de farfurie, în care bătaia ceasului să se audă tot așa de tare ca și cum acesta ar fi pus la ureche. De același fenomen se face uz la construcția cuștii suflerului la teatru. Poziția suflerului și forma cuștii sînt cele mai potrivite pentru a reflecta sunetul spre scenă.

Reflexia sunetului de pereții încăperii interesează foarte mult pe constructorii de teatre, de săli de concerte și de săli de adunări. Acest domeniu al tehnicii construcțiilor care se ocupă cu problema audibilității optime în încăperi închise se numește acustică arhitecturală.

Unde care se deplasează la suprafață

Marinarii de pe submarine nu cunosc furtunile care bîntuie pe mare. În toiul celor mai puternice furtuni, la adîncimi de cîțiva metri sub nivelul mării domnește calmul complet. Valurile mării sînt unul din exemplele de mișcare ondulatorie care cuprinde numai suprafața unui corp.

Uneori se poate părea că valurile mării sînt curenți de mase de apă în mișcare. În realitate nu este așa; oricine se poate convinge cît se poate de ușor de mișcarea ondulatorie a particulelor de apă, dacă observă cum se clatină pe valuri o barcă ai cărei vîslași se odihnesc: în sus, în jos, puțin mai înainte, puțin mai înapoi, dar aproape fără să înainteze de loc. Observații mai precise arată că particulele de apă efectuează o mișcare circulară. Fiecare particulă de apă descrie o traiectorie apropiată de un cerc. Planul acestor cercuri este orientat în direcția de propagare a undelor, adică transversal pe frontul undei.

Ondulațiile mării prezintă aspecte foarte diferite: încrețituri mărunte, valuri mari, valuri care se succed des sau la intervale mari. În limbajul fizicienilor se spune că valurile pot fi de amplitudine și de lungime diferite.

După cum s-a mai spus, ondulațiile se amortizează repede pe măsură ce adîncimea apei crește. Particulele de apă situate sub suprafața apei efectuează oscilații cu amplitudini din ce în ce mai mici pe măsură ce adîncimea crește. Chiar la o adîncime egală cu o jumătate de lungime de undă, amplitudinea oscilațiilor scade de 20 de ori, iar la o adîncime egală cu lungimea de undă, nu mai există aproape nici o mișcare.

Pînă acum am vorbit despre undele a căror viteză de propagare depindea numai de proprietățile mediului. Altfel stau lucrurile cu undele de suprafață: oscilațiile cu frecvențe diferite se propagă cu viteze diferite. Viteza de propagare și perioada oscilațiilor sînt legate între ele prin relația simplă $c = \frac{gT}{2\pi}$, în care g este accelerația gravitației. Este perfect natural ca în această formulă să apară accelerația gravitației g, căci tocmai gravitația face ca suprafața apei să fie plană. Conform acestei formule, la o frecvență a oscilației de 1 Hz, undele se deplasează cu o viteză de circa 1,5 m/s. Această formulă este adevărată pentru valurile din largul mării; în apropiere de coastă și în general unde adîncimea apei este mică, această relație simplă se complică.

Întrucît $\lambda = cT$, avem $c = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}}$. Așadar, cînd se produc valuri mari într-o regiune oarecare a mării, ajung pînă la cele mai îndepărtate locuri mai întîi undele cele mai lungi, care au cea mai mare viteză de propagare.

Cum transmit sunetul corpurile solide

Există o deosebire foarte importantă între transmisia sunetului prin corpurile lichide și prin gaze, pe de o parte, și prin solide, pe de alta. Această deosebire constă în faptul că în corpurile solide, pe lîngă unde longitudinale, pot lua naștere și unde transversale.

Acest termen se explică singur: unda transversală are însușirea că particulele care participă la procesul ondulatoriu efectuează oscilații nu în direcția de propagare a undei, ci în direcția transversală, adică perpendiculară pe direcția de propagare.

Unda sonoră în gaze și lichide este o undă de compresiuni și depresiuni alternative. O astfel de undă nu poate fi decît longitudinală, căci oscilațiile transversale ale particulelor nu pot provoca variații locale ale volumului, adică nu pot avea ca efect compresiuni. În lichide și gaze nu pot exista unde transversale, deoarece aceste medii se opun la compresiuni și întinderi, dar nu la alunecări. Un corp solid se opune nu numai la variația volumului, ci și la modificarea formei sale și, de aceea, pe lîngă undele longitudinale, într-un corp solid pot lua naștere și unde transversale.

În timpul propagării undei transversale într-un mediu solid, se formează o undă de alunecare, adică particulele corpului sînt deplasate de undă alternativ într-un sens și în celălalt față de direcția ei de propagare. Undele longitudinale într-un corp solid însă sînt însoțite de compresiuni și depresiuni ca și undele în lichide și gaze.

Unda transversală și cea longitudinală transmit sunetul la fel de bine, dar nu la fel de repede. Undele longitudinale se propagă întotdeauna mai repede decît cele transversale.

Iată cîteva valori caracteristice. În oțel, viteza undelor transversale este de circa 3 000 m/s, iar a celor longitudinale, de 6 000 m/s. O viteză mai mică de propagare are sunetul în plumb moale — 700 m/s pentru undele transversale și 2 200 m/s pentru cele longitudinale.

Deosebit de mare este raportul dintre viteza undelor longitudinale și cea a celor transversale în cauciuc. Cauciucul se opune foarte slab la modificări ale formei sale, dar își schimbă foarte greu volumul. Undele transversale se propagă în cauciuc cu viteză doar de 30 m/s, adică de 10 ori mai mică decît viteza sunetului în aer.

În afară de aceste două tipuri de unde, într-un corp solid se mai propagă și unde superficiale, dar acestea nu seamănă de loc cu valurile mării, la care forța care readuce particulele după deviere este forța gravitațională. Undele de la suprafața unui corp solid sînt supuse forțelor elastice care leagă între ele particulele corpului. Prin urmare, este natural ca viteza undelor superficiale să depindă de proprietățile elastice ale corpului. Viteza undelor superficiale este aproximativ 0,9 din viteza de propagare a undelor transversale. Ca și în lichide, traiectoria particulelor care oscilează este situată într-un plan transversal pe frontul undei. Punctele se mișcă pe curbe închise asemănătoare unor elipse. Pe măsură ce ne depărtăm de suprafața corpului, forma elipsei se modifică, amplitudinea oscilațiilor devine mai mică și unda se amortizează.

Vestitorii cutremurului de pămînt

Pămîntul transmite bine sunetele. Aproape în orice roman medieval găsiți o scenă în care eroul urmărit fuge călare în galop. „Călărețul opri deodată calul, descălecă și puse urechea la pămînt: «Sînt urmărit, trebuie să mă grăbesc!»". În adevăr, loviturile copitelor calului în pămînt se transmit la o distanță de peste un kilometru. Ca orice corp elastic, Pămîntul este bun conducător al undelor sonore.

Undele sonore care se propagă prin Pămînt ne dau informații despre cutremure și ne aduc la cunoștință procesele care au loc în adîncul Pămîntului. Undele sonore care iau naștere în timpul unui cutremur se numesc unde seismice. Existența undelor seismice, amplitudinea, viteza, lungimea lor de undă și frecvența oscilațiilor — toate acestea pot fi determinate cu ajutorul unor instrumente speciale foarte sensibile numite seismografe.

Seismografele sînt instrumente complicate, dar principiul lor de funcționare este ușor de înțeles. Partea cea mai importantă a unui seismograf o constituie o greutate mare suspendată de un resort. Cînd scoarța Pămîntului se deplasează vertical, punctul de suspensie al resortului de care atîrnă greutatea se deplasează, așa cum se arată în fig. 126. Din cauza inerției sale mari, greutatea rămîne la început pe loc. Pe greutate este fixată o peniță, iar pe suport este fixată o foaie de hîrtie. Cînd suportul se deplasează, penița trage pe hîrtie o linie verticală. Pentru a se înregistra unda seismică, trebuie ca hîrtia să aibă o mișcare de translație.

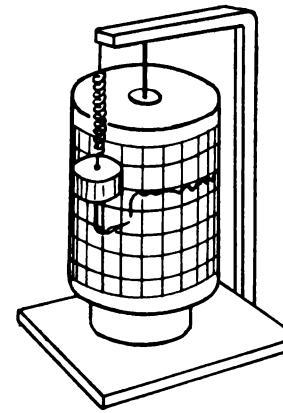


FIG. 126

În afară de aceste seismografe, care înregistrează deplasările verticale ale scoarței Pămîntului, se folosesc și seismografe orizontale. Principiul de funcționare a seismografului orizontal este arătat în fig. 127. Partea principală a acestui instrument este o bară aproape verticală. O greutate excentrică transformă această bară într-un pendul, capabil să se rotească în jurul axei barei. Dacă scoarța Pămîntului este în repaus, greutatea pendulului se găsește în repaus în poziția cea mai de jos. Un impuls în direcție orizontală provoacă deplasarea axei pendulului, pe cînd greutatea, care este destul de mare,

la început rămîne pe loc, în virtutea inerției. Rotirea pendulului este înregistrată de un dispozitiv înregistrator automat.

Dacă se instalează un seismograf vertical și două orizontale, oscilînd în plane perpendiculare unul pe altul, se poate înregistra mărimea și direcția oricărei deplasări.

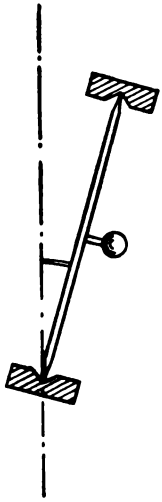


FIG. 127

Cuvintele „cutremur de Pămînt" se asociază, de obicei, cu ideea de case dărîmate, copaci doborîți, crăpături formate în Pămînt și victime omenești. Astfel de cutremure de Pămînt se întîmplă rar, dar seismologii aplică termenul de „cutremur de Pămînt" la toate evenimentele subterane capabile să pună în mișcare pana seismografului care înregistrează oscilațiile scoarței terestre. În afară de seismografe, nimeni nu observă aceste cutremure de Pămînt. Pe globul pămîntesc au loc în fiecare an circa 100 de cutremure, de unde se vede că „împărăția subpămînteană" are o viață foarte activă.

Din focarul unui cutremur de Pămînt, unda seismică se propagă în toate direcțiile și este recepționată de numeroase seismografe instalate în diferite orașe și țări. În legătură cu fiecare impuls subteran se vor transmite trei informații, deoarece toate trei tipurile de unde despre care a fost vorba mai înainte pornesc la drum din centrul cutremurului. Prima care ajunge la observator este unda longitudinală, apoi vine cea transversală, iar ultima este unda superficială.

Undele superficiale sînt cele mai interesante pentru seismolog, deoarece (din motive ușor de înțeles), ele sînt cele mai intense.

La pag. 307 am spus că intensitatea unei unde sonore scade invers proporțional cu pătratul distanței de la sursa de sunete. Această regulă însă nu se aplică undelor superficiale. Să construim în jurul sursei de sunet, în loc de două sfere, două cercuri. Energia undei care trece prin aceste cercuri este proporțională cu $I \cdot 2\pi r$, în care I este intensitatea sunetului. Prin urmare, dacă nu există pierderi de energie, intensitatea undei superficiale scade cu $1/r$, nu ca $1/r^2$. De aceea, aceste unde ajung la observator mult mai puțin atenuate decît undele spațiale longitudinale și transversale.

Studiul undelor seisnice nu numai că duce la stabilirea focarului cutremurelor de Pămînt, ci îngăduie să se întreprindă lucrări vaste și interesante de cercetare asupra structurii Pămîntului. Semnalele primite din adîncurile Pămîntului ne dau infor-

mații asupra structurii lui. În adevăr, viteza undelor seismice la diferite adîncimi este diferită. În apropiere de suprafața solului, undele longitudinale au o viteză de ordinul a 5,5 km/s, iar cele transversale, 3,3 km/s. În același timp, în centrul Pămîntului, viteza de propagare a undelor seismice atinge 11—12 km/s.

Cunoscînd particularitățile de structură care pot influența viteza de propagare a undelor, cercetătorii trag concluzii despre structura miezului Pămîntului. S-a stabilit, de exemplu, că undele transversale nu pătrund în adîncul miezului Pămîntului. De aici se trage concluzia că acest miez este lichid, deoarece undele transversale nu trec prin corpurile lichide.

Unde de șoc

În practica curentă, cuvîntul „undă" este asociat cu ideea unui proces periodic, un exemplu sugestiv în acest sens fiind valurile mării. O distracție preferată a celor ce fac baie în mare este să se lase legănați de „valuri".

În fizică se întrebuințează cuvîntul „undă" în sens mai larg și se vorbește de propagarea unei unde atunci cînd ridicarea sau coborîrea presiunii este provocată de un șoc unic, de o explozie sau de aspirația puternică a aerului.

Unda de aer produsă de o explozie are un aspect foarte parti-

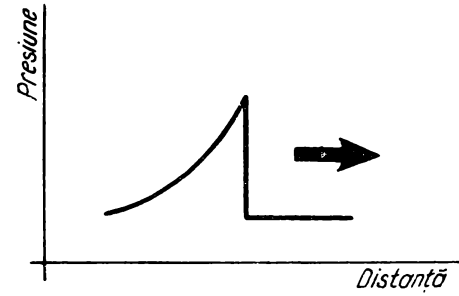


FIG. 128

cular. (Am spus mai înainte că unda de aer poate fi fotografiată, prin urmare cuvîntul „aspect" este cu totul potrivit pentru o undă de presiune.)

În fig. 128 este reprezentat profilul instantaneu al unei astfel de unde de explozie; această curbă prezintă distribuția presiunii

de-a lungul unei direcții oarecare de propagare a undei. Profilul curbei se compune dintr-o ridicare treptată, care se termină cu o coborîre verticală. Pe schemă este indicat sensul de deplasare a undei de la stînga la dreapta. Porțiunile de aer situate la dreapta frontului undei se găsesc în repaus în momentul considerat, căci unda n-a ajuns încă pînă la ele.

Principala particularitate a undei de explozie (sau, cum se mai numește, a undei de șoc) descrise este saltul brusc de presiune pe „frontul undei"; punctele care se găsesc în repaus sînt cuprinse de maximum de presiune aproape instantaneu: o particulă de aer care se găsea la un anumit moment la presiunea atmosferică, în momentul următor este supusă în punctul respectiv la o presiune care a devenit maximă. Apoi, pe măsură ce unda de șoc avansează, presiunea în punctul asupra căruia ne-am fixat atenția va scădea treptat, în conformitate cu profilul pantei line din stînga curbei.

În fig. 128 este reprezentată distribuția presiunii de-a lungul unei direcții oarecare de propagare a undei. Unda se propagă, însă, în spațiu, iar frontul ei este o suprafață.

Frontul undei de șoc este însoțit nu numai de un salt de presiune, ci și de un salt de densitate și de unul de temperatură.

În afară de variația de presiune și de temperatură, unda de șoc se caracterizează și printr-o mișcare. În cazul undei sonore aerul se pune în mișcare de-a lungul direcției de propagare a undei. Dar acest fenomen este puțin sensibil. În cazul undei de șoc, aerul este antrenat atît de puternic, încît cuvîntul de „antrenare" devine prea puțin sugestiv. Unda de șoc produce un vînt extrem de puternic, un uragan... Pentru mișcarea care are loc în undele puternice de șoc poate că nici nu există un cuvînt potrivit.

Saltul proprietăților de care vorbim este extraordinar de brusc — trecerea de la repausul complet la viteza maximă se produce pe o distanță egală cu cîteva lungimi de drum liber al unei molecule de gaz. Pentru aer, aceasta înseamnă o valoare submicroscopică de ordinul sutimilor de miimi de centimetru. Durata saltului se măsoară în fracțiuni din a zecea miliarda parte (10^{-10}) dintr-o secundă. Această variație în adevăr instantanee a presiunii, densității, temperaturii și vitezei este o caracteristică a undei de șoc.

În funcție de forța exploziei, saltul de presiune care însoțește unda de șoc sau, cu alte cuvinte, înălțimea frontului, poate fi foarte diferită: în momentul sosirii undei de șoc, presiunea poate crește între cîteva procente și cîteva zeci de ori.

Valorile salturilor tuturor mărimilor pe frontul undei de șoc sînt în legătură una cu alta. Cunoscînd valoarea saltului de pre-

siune, se poate calcula și valoarea saltului de densitate, de temperatură și de viteză. Înălțimea frontului determină și viteza de propagare a undei de șoc. Viteza undelor slabe de șoc nu diferă de viteza de propagare a unei unde sonore obișnuite. Pe măsură ce înălțimea frontului crește, crește și viteza de propagare a undei de șoc.

Vom da cîteva date numerice despre o undă de șoc „modestă", care mărește presiunea o dată și jumătate. O astfel de creștere de presiune atrage după sine o mărire a densității aerului cu 30% și o ridicare a temperaturii cu 35°. Viteza frontului unei astfel de unde de șoc este de circa 400 m/s. Chiar în cazul saltului destul de mic de presiune de 1,5 ori, unda de șoc antrenează aerul cu o viteză de circa 100 m/s, adică 360 km/h. Nici un uragan nu atinge această viteză.

Sînt însă posibile explozii capabile să producă unde de șoc incomparabil mai puternice. Dacă unda implică o creștere de zece ori a presiunii, pe frontul undei se produce o mărire în salt a densității de patru ori și o creștere a temperaturii cu 500°. În acest caz, viteza vîntului atinge 725 m/s. Viteza de propagare a unei astfel de unde de șoc este egală cu 1 km/s.

Undele de șoc provocate de exploziile puternice se propagă la zeci de kilometri. Saltul proprietăților pe care-l produce unda de șoc acționează ca o ciocnire bruscă de un obstacol întîlnit de undă în calea ei. Undele slabe de șoc sparg geamurile, dărîmă pereții caselor și smulg arborii din rădăcini. Efectul distrugător al aruncătoarelor de mine se bazează în mare parte pe acțiunea undelor de șoc.

Efectul distrugător al undelor de șoc depinde foarte mult de multe împrejurări și în special de durata undei. Pentru a da totuși o oarecare idee despre legătura dintre efectul distrugător al undei și parametrul principal al ei — creșterea presiunii — indicăm că o undă de șoc cu frontul înălțimii doar de 2% este capabilă să spargă geamurile, iar o undă care implică o mărire de două ori a presiunii dărîmă chiar ziduri groase.

Mișcarea cu viteze supersonice

După cum am mai spus, undele de șoc se propagă cu viteze supersonice. Mișcarea corpurilor solide în aer cu viteze supersonice are de asemenea ca rezultat formarea de unde de șoc. De

aceea, undele de șoc au o importanță foarte mare pentru aviația modernă.

Mișcarea cu viteze depășind cu mult 330 m/s, adică 1 200 km/h a devenit o realitate în aviație. Mișcarea avioanelor și avioanelor-rachetă, care străbat spațiul cu viteze care trec peste bariera sunetului — așa se numește limita de 1 200 km/h — diferă foarte mult de mișcările din partea cealaltă a barierei sunetului. Această diferență constă în faptul că în fața corpului care zboară cu o viteză supersonică se formează o undă de șoc.

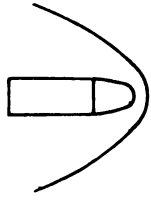


FIG. 129

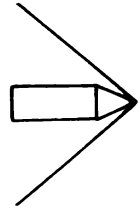


FIG. 130

Aspectul undei de șoc creată de un proiectil cu forme rotunjite este reprezentat în fig. 129. Frontul undei este o suprafață curbă, care trece ceva mai în fața corpului în mișcare. Pe măsura depărtării de traiectoria mișcării, frontul rămîne în urmă și se depărtează de proiectil.

Imaginea undei de șoc la un corp ascuțit avînd o formă de proiectil se prezintă puțin diferit. Din fig. 130 se vede că unda de șoc „s-a așezat pe nasul" proiectilului, iar frontul undei a căpătat o formă conică.

Un proiectil care se deplasează cu o viteză supersonică poate fi fotografiat. Diferența pronunțată dintre densitatea aerului în jurul proiectilului conturează clar frontul undei de șoc căreia îi dă naștere. Cu cît proiectilul se deplasează mai repede, cu atît conul undei este mai ascuțit.

Unda de șoc este principala cauză a rezistenței întîmpinate de un corp care se deplasează cu o viteză supersonică. La viteze mai mici decît viteza sunetului însă, rezistența se datorește, după cum am spus, în special apariției mișcării turbulente. De aceea, formele cele mai avantajoase ale corpurilor pentru mișcările de aceste două tipuri sînt diferite. Ceeace este avantajos pentru mișcările rapide este dezavantajos pentru cele mai lente, și invers.

Un corp ascuțit la partea dinainte favorizează turbulența și deci mărește rezistența, care se opune mișcării cu viteze subsonice. Dimpotrivă, forma ascuțită a proiectilului micșorează rezistența opusă de unda de șoc.

Un corp bont la partea din față micșorează turbulența și, de aceea, este mai avantajos la viteze subsonice decît unul ascuțit. La trecerea peste bariera sunetului, această formă devine mai

puțin avantajoasă, deoarece cauza principală a rezistenței devine unda de șoc. Pentru acest motiv, proiectilele de tun sînt ascuțite la partea anterioară, căci se deplasează cu viteze supersonice.

Din păcate, este imposibil să se suprime unda de șoc și totodată principala sursă de rezistență întîmpinată de un corp care străbate aerul cu o viteză supersonică. Sarcina constructorilor de proiectile și de avioane constă în a micșora rezistența opusă de undele de șoc.

La proiectilele și fuzelajele de avion, micșorarea rezistenței aerului se realizează prin adoptarea unei forme ascuțite la partea din față. Dar ce idee se poate propune pentru aripi? Avioanele supersonice au căpătat în ultimii zece ani noi contururi: aripile s-au strîns pe lîngă fuzelaj, iar avionul a căpătat o formă de săgeată. Acest lucru s-a făcut tocmai pentru a combate rezistența undei de șoc (fig. 131).

În loc de a analiza mișcarea unui avion care spintecă aerul, se poate vorbi de curentul de aer care vine în întîmpinarea avionului. De fapt, este același lucru.

În fig. 131 este reprezentat un avion ale cărui aripi au o poziție oblică față de curent. Vectorul vitezei aerului față de aripă se poate descompune în doi vectori, unul dirijat în lungul aripii, iar celălalt perpendicular pe muchia ei. Aerul alunecă nestingherit în lungul aripii și această mișcare de alunecare longitudinală nu poate fi o cauză serioasă de rezistență. Aripa va întîmpina principala rezistență datorită mișcării aerului perpendicular pe aripă. Dar componenta transversală a vitezei cu care se mișcă aerul în întîmpinarea aripii poate fi mult mai mică decît viteza frontală. Se poate întîmpla chiar ca, în timpul deplasării avionului cu o viteză supersonică, viteza transversală a aerului în raport cu aripile să fie inferioară barierei sunetului. Această reducere a vitezei transversale are ca efect slăbirea undelor de șoc și micșorarea rezistenței opuse de ele. Iată deci de ce se dă avioanelor supersonice forma de săgeată.

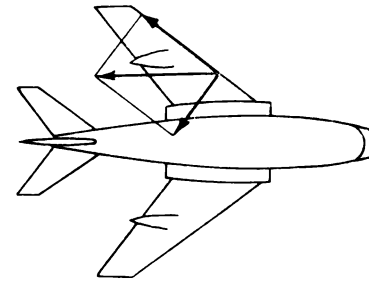


FIG. 131

De altfel, constructorii de avioane au de rezolvat o problemă grea — să găsească un compromis între formele avantajoase pentru viteze supersonice și pentru cele obișnuite. Acest compromis

este necesar pentru simplul motiv că orice avion decolează și aterizează cu viteze relativ mici.

În prezent există avioane cu reacție care zboară cu viteze de mai multe mii de kilometri pe oră și constructorii își continuă munca în vederea cuceririi unor viteze și mai mari. În fața lor se ridică însă noi dificultăți. După ce au învins bariera sunetului, inginerii au dat peste bariera căldurii.

Un avion sau un proiectil care se mișcă cu viteză mare comprimă aerul care se găsește în fața sa. Compresiunea are ca efect ridicarea temperaturii. Aerul despicat de un corp în mișcare se încălzește și, prin urmare, și pereții avionului se încălzesc.

Ridicarea temperaturii este proporțională cu pătratul vitezei aerului. Cu cît viteza este mai mare, cu atît aerul se încălzește mai tare. În momentul în care se atinge bariera sunetului, temperatura aerului în fața avionului se ridică doar cu 60°. Această ridicare a temperaturii nu are o prea mare importanță practică. Însă la o viteză a avionului de două ori mai mare decît viteza sunetului, aerul se încălzește cu 240°, iar cînd avionul atinge o viteză de trei ori mai mare decît viteza sunetului, aerul ajunge la o temperatură de aproximativ 820°C și așa mai departe. Această încălzire atrage după sine complicații tehnologice considerabile.

Din valorile de mai înainte se vede ce repede se mărește temperatura cînd viteza crește. În cazul mișcării cu o viteză de aproximativ 10 km/s, temperatura devine atît de ridicată încît orice corp se topește și se transformă în gaz. Din spațiul cosmic pătrund neîncetat în atmosfera Pămîntului corpuri meteoritice — pietre și pietricele de diferite dimensiuni. Ele se deplasează cu viteze de cîteva zeci de kilometri pe secundă. La o înălțime de 150—200 km deasupra Pămîntului, cînd atmosfera devine mai puțin rarefiată, acești „musafiri" încep să se încălzească sensibil, iar la înălțimi de 130—60 km, temperatura lor crește atît de mult, încît corpurile se volatilizează. Noi vedem cu ochiul liber aceste corpuri incandescente pe cer în timpul nopții. În momentul cînd le-am văzut ni se pare că a căzut o stea de pe cer. „Căderea stelei" durează puțin, o fracțiune de secundă, după care corpul s-a și volatilizat.

Arderea și explozia

Pentru ca arderea să înceapă, este necesar, după cum se știe, să se apropie de obiectul inflamabil un chibrit aprins. Dar nici chibritul nu se aprinde singur, ci trebuie să fie frecat pe cutie.

Așadar, pentru ca să înceapă reacția chimică este necesară o încălzire prealabilă.

Cauza este ușor de înțeles. O reacție chimică este o rearanjare a moleculelor. Pentru ca să se poată produce o astfel de rearanjare, este absolut necesară o mișcare termică energică a atomilor. De aceea, viteza unei reacții chimice depinde foarte mult de temperatură. De regulă, o ridicare a temperaturii cu 10° mărește viteza de reacție de 2—4 ori.

Dacă viteza de reacție se mărește, să zicem, de trei ori cînd temperatura se ridică cu 10°, o ridicare a temperaturii cu 100° va face ca viteza să crească de $3^{10} \approx 60\,000$ de ori, o ridicare cu 200°— de $3^{20} \approx 4 \cdot 10^9$ ori, iar cu 500° — de 3^{50} ori, adică aproximativ de 10^{24} ori.

Nu este deci de mirare că o reacție care are loc cu viteză normală la temperatura de 500°C, nu se mai produce de loc la temperatura camerei. Aprinderea produce în momentul inițial temperatura necesară pentru reacție. Apoi temperatura înaltă este întreținută de căldura care se degajează în timpul reacției.

Preîncălzirea locală inițială trebuie să fie suficientă pentru ca degajarea de căldură în timpul reacției să fie mai mare decît cedarea de căldură în mediul rece înconjurător. De aceea, fiecare reacție are, cum se spune, temperatura sa de inflamabilitate. Arderea începe numai dacă temperatura inițială este mai mare decît temperatura de inflamabilitate. De exemplu, temperatura de inflamabilitate a lemnului este de 610°C, a benzinei — de 200°C, iar a fosforului alb — de 50°C.

Arderea lemnului, a cărbunelui sau a petrolului este o reacție chimică de combinare a acestor substanțe cu oxigenul din aer. De aceea, această reacție începe de la suprafață: pînă ce nu arde stratul superior, următorul nu poate lua parte la ardere. Așa se și explică de ce arderea este relativ lentă.

Este ușor să ne convingem în practică de adevărul celor afirmate. Dacă se mărunțește combustibilul, se poate mări considerabil viteza de ardere. În acest scop, în multe instalații de cuptoare se face pulverizarea cărbunelui în focare.

Cu totul altfel stau lucrurile în cazul în care nu este nevoie de aerul atmosferic, căci tot necesarul pentru reacție se găsește în interiorul substanței respective. Un exemplu de astfel de substanță este un amestec de hidrogen și oxigen (el se numește gaz detonant). Reacția nu are loc la suprafață, ci se produce în interiorul substanței. Spre deosebire de cazul arderii, toată energia care se pune în libertate cu prilejul reacției se degajează aproape

instantaneu, din care cauză presiunea crește enorm și se produce o explozie. Gazul detonant nu arde, ci explodează.

Așadar, un exploziv trebuie să conțină în sine atomii sau moleculele necesare pentru reacție. Bineînțeles că se pot pregăti amestecuri gazoase explozibile. Există și explozivi solizi. Ei sînt explo-

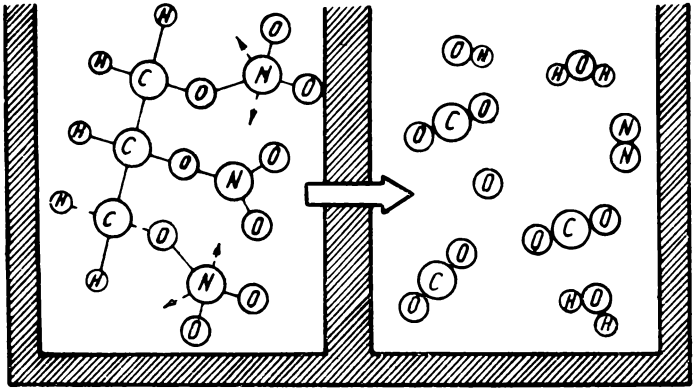


FIG. 132

zibili tocmai pentru că în compoziția lor intră toți atomii necesari pentru reacția chimică din care rezultă căldură și lumină.

Reacția chimică care are loc în cazul exploziei este o reacție de descompunere, de disociere a moleculelor în părțile componente. În fig. 132 este reprezentată, cu titlu de exemplu, o reacție de explozie, adică disocierea moleculelor de nitroglicerină. După cum se vede în partea din dreapta a schemei, dintr-o moleculă inițială se formează molecule de bioxid de carbon, apă și azot. În compoziția produselor de reacție găsim produsele obișnuite de ardere, dar arderea a avut loc fără să participe la ea moleculele de oxigen din aer, căci toți atomii necesari sînt conținuți în moleculele de nitroglicerină.

Cum se propagă explozia prin exploziv, de exemplu prin gazul detonant? Cînd se dă foc unui exploziv, se produce o încălzire locală. Reacția are loc în volumul încălzit. Dar în timpul reacției se degajează căldură, care prin transmisie termică trece în straturile vecine ale amestecului. Această căldură este suficientă pentru ca și în stratul vecin să se producă reacția. Noile cantități de căldură care se degajează pătrund în straturile următoare de gaz detonant și astfel reacția se propagă în toată substanța cu o viteză determinată de transmisia de căldură. Viteza acestei trans-

misii este de ordinul a 20—30 m/s. Această viteză este foarte mare. Un tub de un metru lungime umplut cu gaz explodează în a douăzecea parte dintr-o secundă, adică aproape instantaneu, pe cînd viteza de ardere a lemnelor sau a cărbunelui în bucăți, ardere care are loc de la suprafață. nu în volum, este de cîțiva centimetri pe minut, adică de cîteva mii de ori mai mică.

Cu toate acestea, și această explozie poate fi numită lentă, deoarece este posibilă și altă explozie, de sute de ori mai rapidă decît cea descrisă.

O explozie rapidă este provocată de unda de șoc. Dacă într-un strat oarecare de substanță se mărește brusc presiunea, din acest punct începe să se propage o undă de șoc. După cum știm, unda de șoc are ca efect un salt însemnat de temperatură. Ajungînd în stratul vecin, unda de șoc îi ridică temperatura. Ridicarea temperaturii face să înceapă reacția de explozie, iar explozia provoacă creșterea presiunii și întreține unda de șoc, a cărei intensitate ar scădea altminteri pe măsură ce se propagă. Așadar, unda de șoc provoacă explozia, iar explozia, la rîndul ei, întreține unda de șoc.

Explozia descrisă mai înainte se numește detonație. Întrucît detonația se propagă prin substanță cu viteza undei de șoc (de ordinul 1 km/s), ea este în adevăr mai rapidă de sute de ori decît o explozie „lentă".

Care substanțe explodează „încet" și care „repede"? Problema nu se poate pune așa, căci una și aceeași substanță, găsindu-se în condiții diferite, poate și să explodeze „încet" și să detoneze, iar în unele cazuri explozia „lentă" se transformă în detonație.

Unele substanțe, de exemplu iodura de azot, explodează prin atingerea cu un fir de pai, printr-o încălzire ușoară sau printr-o sclipire de lumină. Un exploziv cum este trotilul nu explodează dacă este lăsat să cadă din mînă sau chiar dacă se trage cu pușca în el. Pentru a exploda este nevoie de o undă de șoc puternică.

Există substanțe și mai puțin sensibile la influențe exterioare. Amestecul de azotat de amoniu și sulfat de amoniu servind ca îngrășămînt nu era considerat exploziv pînă la întîmplarea tragică care a avut loc în anul 1921 la Uzinele chimice germane din Oppau. Pentru sfărîmarea amestecului care se aglutina s-a folosit metoda exploziei. Rezultatul a fost că a sărit în aer depozitul și toată uzina. Nenorocirea nu a putut fi imputată inginerilor uzinei, căci aproximativ douăzeci de mii de explozii decurseseră normal și numai o dată s-au creat condiții favorabile pentru detonație.

Substanțele care explodează numai sub influența unei unde de șoc, dar care în condiții obișnuite sînt stabile și chiar nu sînt inflamabile, sînt foarte avantajoase pentru tehnica exploziilor. Astfel de substanțe se pot fabrica și depozita în mari cantități. Dar pentru a pune în acțiune acești explozivi inerți sînt necesari promotori sau, cum se spune, inițiatori de explozie (de amorsare). Acești explozivi de amorsare sînt absolut necesari ca surse de unde de șoc.

Ca exemple de substanțe inițiatoare, se pot cita azotatul de plumb și fulminatul de mercur. Dacă se pune un grăunte dintr-o astfel de substanță pe o foaie de tinichea și i se dă foc, se produce o explozie care face în tinichea o gaură. Explozia acestor substanțe are caracter de detonație în orice condiții.

Dacă se pune puțin azotat de plumb pe o încărcătură de exploziv secundar și i se dă foc, explozia inițiatorului produce o undă de șoc suficientă pentru detonarea explozivului secundar. În practică, explozia se produce cu ajutorul unei amorse-detonator (1—2 g de substanță inițiatoare). Amorsa poate fi pusă la distanță, de exemplu, cu ajutorul unui fitil (fitil Bickford) lung; unda de șoc care pornește de la amorsă face să explodeze explozivul secundar.

În unele cazuri, tehnica trebuie să combată fenomenele de detonație. Într-un motor de automobil, în condiții obișnuite, se produce o explozie „lentă" a amestecului de benzină și aer. Uneori însă se produce și detonația. Undele de șoc sînt absolut inadmisibile în motor ca fenomen sistematic, deoarece sub influența lor, pereții cilindrilor motorului sînt repede scoși din serviciu.

Pentru combaterea detonației, trebuie fie să se folosească în motoare benzină specială (așa-numita benzină cu cifră octanică mare), fie să se amestece în benzină substanțe speciale antidetonante, care nu lasă să se dezvolte unda de șoc. Una dintre aceste substanțe este tetraetil-plumbul. Această substanță este foarte toxică și instrucțiunile avertizează pe șoferi să umble cu atenție cu o astfel de benzină.

Cînd se proiectează tunurile, trebuie să se caute evitarea detonației. Nu trebuie să se formeze unde de șoc în interiorul țevii cînd se trage cu tunul, căci în caz contrar, acesta se distruge.

XVI

Energia în jurul nostru

Cum se transformă energia în lucru-mecanic

Omul are nevoie de mașini, în care scop trebuie să știe să producă mișcare — să miște pistoane, să învîrtească roți, să tragă vagoane de tren. Pentru a mișca mașinile, este nevoie de lucru mecanic. Cum se poate obține el?

Analizînd această problemă, am găsit că lucrul mecanic se produce pe seama energiei. Dacă se ia energie de la un corp sau de la un sistem de corpuri, se obține lucru mecanic.

Rețeta este perfect justă, dar încă n-am atins problema modului în care să se efectueze această transformare. Este, oare, întotdeauna posibil să se ia energie de la un corp? Ce condiții sînt necesare în acest scop? Vom vedea imediat că aproape toată energia existentă în jurul nostru este absolut inutilă, căci nu poate fi transformată în lucru mecanic. Această energie nu poate fi nicidecum înglobată printre resursele noastre energetice. Să lămurim această problemă.

Un pendul deviat din poziția de echilibru se va opri mai curînd sau mai tîrziu; roata unei biciclete, așezată cu roțile în sus, învîrtită cu mîna va face multe rotații, dar în cele din urmă de asemenea va înceta să se miște. Nu există excepții de la această lege importantă: toate corpurile care ne înconjură și care se mișcă de la sine în cele din urmă se opresc[1].

[1] Aici nu s-a avut în vedere, bineînțeles, mișcarea uniformă de translație și mișcarea uniformă de rotație a unui sistem de corpuri ca un tot.

Dacă avem două corpuri, unul cald și altul rece, căldura se va transmite de la primul la al doilea pînă ce temperaturile lor vor deveni egale. Atunci transmisia căldurii încetează, iar starea corpurilor nu se mai modifică. Se stabilește un echilibru termic.

Nu există fenomen în care corpurile să iasă de la sine din starea de echilibru. Nu poate exista vreun caz în care o roată montată pe o axă să înceapă să se rotească singură. Nu s-a întîmplat niciodată ca o călimară stînd pe masă să se încălzească de la sine.

Tendința spre echilibru conduce la concluzia că evenimentele urmează un curs natural: căldura trece de la un corp cald la altul rece, dar nu poate trece de la sine de la un corp rece la unul cald.

Energia mecanică a unui pendul care oscilează se transformă în căldură, din cauza rezistenței aerului și a frecării în dispozitivul de suspensie. În nici un fel de condiții însă pendulul nu va începe să oscileze din cauza căldurii existente în mediul înconjurător. Corpurile ajung în stare de echilibru, dar nu pot ieși singure din ea.

Această lege a naturii arată imediat ce parte din energia care ne înconjură este complet inutilă. E vorba de energia termică a mișcării moleculelor corpurilor aflate în stare de echilibru. Aceste corpuri nu-și pot transforma energia în mișcare mecanică.

Această parte de energie este enormă. Să calculăm mărimea acestei energii „moarte". Dacă se scade temperatura cu 1°, un kilogram de pămînt, avînd căldura specifică de 0,2 kcal/kg, pierde 0,2 kcal. Valoarea este relativ mică, dar să calculăm cîtă energie am căpăta dacă am reuși să răcim doar cu un grad o cantitate de substanță avînd masa globului pămîntesc egală cu $6 \cdot 10^{24}$ kg. Făcînd înmulțirea, căpătăm valoarea colosală de $1{,}2 \cdot 10^{24}$ kcal. Ca să ne putem face o idee despre această mărime, vom aminti că în prezent energia produsă anual de centralele electrice din toată lumea este de aproximativ 10^{15}—10^{16} kcal, adică de un miliard de ori mai mică.

Nu trebuie să ne mirăm că astfel de calcule au un efect hipnotic asupra inventatorilor improvizați. Am vorbit mai înainte despre încercările de a se construi un motor veșnic („perpetuum mobile"), care să producă lucru mecanic din nimic. Operînd cu principiile fizicii care rezultă din legea conservării energiei, este imposibil să se răstoarne această lege prin crearea unui perpetuum mobile (acum îl vom numi perpetuum mobile de speța întîi). Aceeași greșeală o fac și inventatorii ceva mai ingenioși, creatori de tipuri de motoare care efectuează o mișcare mecanică

pe seama doar a încălzirii mediului. Acest motor, vai!, irealizabil, se numește perpetuum mobile de speța a doua. Și aici se comite o eroare de logică, întrucît inventatorul se bazează pe legile fizicii, care sînt o consecință a legii tendinței tuturor corpurilor către starea de echilibru și, cu ajutorul acestor legi, încearcă să răstoarne temeliile pe care sînt clădite.

Așadar, numai prin luarea de căldură de la mediu nu se poate produce lucru mecanic. Cu alte cuvinte, un sistem de corpuri care se găsesc în echilibru unul cu altul este steril din punct de vedere energetic.

Prin urmare, pentru a se obține lucru mecanic, este necesar în primul rînd să se găsească corpuri care nu se găsesc în echilibru cu vecinele lor. Numai atunci se va putea realiza procesul de trecere a căldurii de la un corp la altul sau de transformare a căldurii în energie mecanică.

Condiția necesară pentru obținerea de lucru mecanic este crearea unui flux de energie. În „drumul" acestui flux, este posibil ca energia corpurilor să se transforme în lucru mecanic.

De aceea, dintre resursele de energie utile pentru om face parte numai energia acelor corpuri care nu se găsesc în echilibru cu mediul ambiant.

Tendința spre dezordine

Dacă sînt lăsate pe seama lor, corpurile tind spre echilibru. Starea naturală a corpurilor este echilibrul mecanic și termic. Vom face cunoștință mai amănunțită cu consecințele practice ale acestei legi extrem de importante a naturii.

Care este însă sensul intim al acestei legi? De ce tot universul este un drum spre starea de echilibru? De ce corpurile lăsate în voia lor se apropie în mod ireversibil de starea în care mișcarea mecanică se oprește, iar temperaturile corpurilor se egalizează?

Această problemă este foarte importantă și interesantă. Pentru a răspunde la ea trebuie să începem mai de departe.

Cazurile ordinare, care se întîmplă frecvent, se întîlnesc la fiecare pas; ele sînt probabile. Dimpotrivă, se consideră cazuri neprobabile evenimentele care s-au petrecut datorită unui concurs excepțional de împrejurări.

Un eveniment neprobabil, ca să se producă, nu are nevoie de intervenția unor forțe supranaturale. El nu are nimic imposibil,

nimic în contradicție cu legile naturii. Și totuși, în multe cazuri, sîntem perfect convinși că neprobabilul este practic identic cu imposibilul.

Priviți lista numerelor cîștigătoare la loterie. Socotiți cîte bilete au numere care se termină cu cifra 4 sau 5, sau 6. Nu vă mirați de fel cînd găsiți că fiecărei cifre îi corespunde aproximativ a zecea parte din biletele cîștigătoare.

Dar s-ar putea ca biletele cu numere care se termină cu 5 să nu reprezinte a zecea parte, ci a cincia parte din numărul total? E puțin probabil, veți spune. Dar ce-ar fi ca jumătate din biletele cîștigătoare să aibă numere terminate cu cifra 5? A, nu, asta este cu totul neprobabil... și deci imposibil.

Dacă ne gîndim bine ce condiții sînt necesare pentru ca un eveniment să fie probabil, ajungem la următoarea concluzie: probabilitatea unui eveniment depinde de numărul de moduri în care poate fi realizat. Cu cît numărul de moduri este mai mare, cu atît evenimentul respectiv se va produce mai des.

Mai exact, probabilitatea este raportul dintre numărul de moduri de realizare a unui eveniment dat și numărul de moduri de realizare a tuturor evenimentelor posibile.

Scrieți cifrele de la 0 la 9 pe zece cartonașe rotunde și băgați-le într-o pungă. Apoi scoateți un astfel de cartonaș, notați numărul de pe el și puneți-l înapoi. Această operație este foarte asemănătoare cu tragerea unei loterii. Se poate spune cu certitudine că nu veți trage același număr, să zicem, de 7 ori la rînd, chiar dacă ați sacrifica o seară întreagă acestei operații plicticoase. De ce? Scoaterea a șase numere identice este un eveniment care se poate realiza doar în zece moduri (7 de zero, 7 de unu, 7 de doi ș.a.m.d.). În total însă există 10^7 posibilități de a trage șapte cartonașe. De aceea, probabilitatea de a scoate la rînd șapte cartonașe cu același număr este egal cu $10/10^7 = 10^{-6}$, adică doar la unul la un milion.

Dacă se introduc într-o lădiță grăunțe negre și albe și se amestecă cu o lopățică, foarte curînd grăunțele se distribuie uniform în toată lădița. Scoțînd la întîmplare un pumn de grăunțe, vom găsi în el aproximativ același număr de grăunțe albe și negre. Oricît le-am amesteca, rezultatul va fi mereu același — uniformitatea se menține. Dar de ce nu se produce separarea grăunțelor? De ce prin amestecarea îndelungată nu izbutim să adunăm grăunțele negre la partea de sus și pe cele albe la partea de jos? Și aici este vorba tot de probabilitate. Situația în care grăun-

ţele sînt distribuite dezordonat, adică cele negre şi cele albe sînt distribuite uniform, poate fi realizată într-un număr enorm de moduri şi, prin urmare, are cea mai mare probabilitate. Dimpotrivă, situaţia în care toate grăunţele albe se găsesc jos iar cele negre sus este unică. De aceea probabilitatea realizării ei este infimă.

De la grăunţele din pungă putem trece uşor la moleculele din care sînt alcătuite corpurile. Comportarea moleculelor se supune hazardului. Acest lucru se vede deosebit de izbitor în exemplul gazelor. După cum ştim, moleculele de gaz se ciocnesc în mod dezordonat, se mişcă în toate direcţiile posibile, cînd cu o viteză, cînd cu alta. Această mişcare termică perpetuă frămîntă neîncetat moleculele, le amestecă, aşa cum face lopăţica cu grăunţele din lădiţă.

Camera în care ne găsim e plină cu aer. De ce nu se poate întîmpla la un moment dat ca moleculele din jumătatea inferioară a camerei să treacă în jumătatea superioară, sub plafon? Un astfel de proces nu este imposibil, dar e foarte neprobabil. Dar ce înseamnă foarte neprobabil? Dacă acest fenomen ar fi chiar de un miliard de ori mai puţin probabil decît distribuţia dezordonată a moleculelor, totuşi cineva ar putea să aştepte să-l vadă împlinit. Nu cumva şi noi ne putem aştepta să se producă un asemenea fenomen?

Calculul arată că un asemenea eveniment se întîlneşte într-un vas cu volumul de 1 cm^3 o dată la $10^{30\,000\,000\,000\,000\,000\,000}$ de ori. Aproape că nu mai merită să facem diferenţă între cuvintele „extrem de neprobabil" şi „imposibil". Numărul de mai înainte este neînchipuit de mare; dacă l-am împărţi la numărul de atomi nu numai de pe globul pămîntesc, ci din tot sistemul solar, el ar rămîne totuşi enorm.

Care va fi însă starea moleculelor de gaz? Cea mai probabilă. Iar cea mai probabilă stare va fi aceea care se poate realiza în cel mai mare număr de moduri, adică distribuţia dezordonată a moleculelor, în care există aproximativ acelaşi număr de molecule care se deplasează la dreapta şi la stînga, în sus şi în jos, în care în fiecare volum se găseşte acelaşi număr de molecule, aceeaşi fracţiune de molecule rapide şi lente în partea superioară şi în cea inferioară a vasului. Orice abateri de la această dezordine, adică de la amestecarea uniformă şi dezordonată a moleculelor în ce priveşte locurile ocupate de ele şi vitezele lor, atrage după sine o micşorare a probabilităţii sau, mai pe scurt, reprezintă un eveniment neprobabil.

Dimpotrivă, fenomenele în legătură cu amestecarea, cu trecerea de la ordine la dezordine măresc probabilitatea stării.

Așadar, aceste evenimente vor fi cele care vor determina mersul natural al evenimentelor. Legea imposibilității realizării unui perpetuum mobile de speța a doua, legea tendinței tuturor corpurilor spre starea de echilibru, își găsește astfel explicația. De ce mișcarea mecanică se transformă în mișcare termică? Pentru că mișcarea mecanică este ordonată, pe cînd cea termică este dezordonată. Trecînd de la ordine la dezordine, se mărește probabilitatea stării.

Fizicienii folosesc adesea o mărime auxiliară numită entropie. Entropia caracterizează gradul de ordine și este legată printr-o formulă simplă de numărul de moduri în care se poate realiza starea. Nu vom da aici formula, ci vom spune numai că cu cît crește probabilitatea, cu atît entropia este mai mare.

Legea naturii pe care o vom analiza acum spune: toate procesele naturale au loc în așa fel, încît probabilitatea stării să crească. Cu alte cuvinte, aceeași lege a naturii se formulează ca legea creșterii entropiei.

Legea creșterii entropiei este o lege extrem de importantă a naturii. Din ea decurge, în particular, și imposibilitatea construirii unui perpetuum mobile de speța a doua sau, ceea ce e același lucru, principiul că corpurile lăsate în seama lor tind spre echilibru.

Legea creșterii entropiei se numește uneori al doilea principiu al termodinamicii (termodinamica este știința căldurii). Dar primul principiu? Este legea conservării energiei.

Denumirea de „principii ale termodinamicii" care s-a dat acestor legi ale naturii are un istoric. Nu se poate spune că această punere „în aceeași oală" a fost izbutită. În adevăr, legea conservării energiei este o lege mecanică, de care ascultă riguros atît corpurile mari, cît și atomii și moleculele individuale. În ce privește însă legea creșterii entropiei, după cum rezultă din cele spuse mai înainte, ea este aplicabilă numai la o grupare destul de mare de particule, dar este pur și simplu imposibil de formulat pentru moleculele individuale.

Caracterul statistic (aceasta înseamnă tocmai că el se referă la o grupare mare de particule) al principiului al doilea al termodinamicii nu-i reduce cu nimic importanța. Legea creșterii entropiei predetermină sensul proceselor. În acest sens, entropia se poate numi directorul administrativ al bogățiilor naturii, iar energia este contabilul său.

Cui îi revine cinstea descoperirii acestei legi importante a naturii? Ca să răspundem la această întrebare, nu ne putem mărgini la un singur nume. Al doilea principiu al termodinamicii își are istoria sa.

RUDOLF CLAUSIUS (1822—1888) — eminent fizician teoretician german. Clausius a formulat pentru prima oară în mod clar a doua lege a termodinamicii în anul 1850 sub forma principiului imposibilității transmiterii de la sine a căldurii de la un corp mai rece la altul mai cald, iar în anul 1865, cu ajutorul noțiunii entropie introdusă tot de el, Clausius a fost printre cei dintîi care s-a ocupat de problemele căldurii specifice a gazelor poliatomice și de conductibilitatea termică a gazelor. Lucrările lui Clausius asupra teoriei cinetice a gazelor au contribuit la dezvoltarea concepțiilor statistice asupra proceselor fizice. Lui Clausius îi aparțin o serie de lucrări interesante despre fenomenele electrice și magnetice.

Şi aici, ca şi în istoria primului principiu al termodinamicii, în primul rînd trebuie să fie amintit numele francezului Sadi Carnot. În anul 1824, el a tipărit pe cheltuiala sa o lucrare cu titlul *Reflecţii asupra forţei motoare a focului*. În această lucrare se găseşte pentru prima oară ideea că căldura nu poate trece de la un corp rece la altul cald fără a se consuma lucru mecanic. Carnot arăta, de asemenea, că randamentul maxim al unei maşini termice (vezi mai departe) este determinat numai de diferenţa de temperatură dintre mediul încălzitor şi mediul răcitor.

Abia după moartea lui Carnot, în anul 1832, alţi fizicieni au acordat atenţie acestei lucrări. Ea însă n-a influenţat prea mult dezvoltarea mai departe a ştiinţei, din cauză că toată opera lui Carnot era construită pe o „substanţă" indestructibilă şi imposibil de creat — termogenul.

Abia după lucrările lui Mayer, Joule şi Helmholtz, care au stabilit legea echivalenţei căldurii şi lucrului mecanic, marele fizician german Rudolf Clausius (1822—1888) a ajuns la al doilea principiu al termodinamicii şi l-a formulat matematic. Clausius a studiat entropia şi a arătat că, în esenţă, al doilea principiu al termodinamicii se reduce la creşterea inevitabilă a entropiei în toate procesele reale.

Al doilea principiu al termodinamicii permite să se formuleze o serie de legi generale de care trebuie să asculte toate corpurile, oricum ar fi ele construite. Mai rămîne însă o problemă: cum să se găsească legătura dintre structura unui corp şi proprietăţile sale? La această întrebare răspunde acea parte a fizicii numită fizica statistică.

Pentru calculul mărimilor fizice care descriu starea unui sistem constînd din miliarde de miliarde de particule, este absolut necesar un nou mod de abordare a problemei. Ar fi absurd, fără a mai vorbi că ar fi şi absolut imposibil, să se urmărească mişcarea tuturor particulelor şi să se descrie această mişcare cu ajutorul formulelor mecanicii. Dar tocmai acest număr imens de particule permite să se aplice studiului corpurilor noile metode „statistice". Aceste metode fac uz larg de noţiunea de probabilitate a evenimentelor. Bazele fizicii statistice au fost puse de remarcabilul fizician austriac Ludwig Boltzmann (1844—1906). Într-un număr de lucrări, Boltzmann a arătat în ce mod programul menţionat poate fi realizat pentru gaze.

În anul 1877, încheierea logică a acestor cercetări a făcut-o interpretarea statistică dată de Boltzmann celui de-al doilea principiu al termodinamicii. Formule care leagă entropia şi probabilitatea stării unui sistem a fost gravată pe monumentul lui Boltzmann.

Este greu de evaluat meritul științific al lui Boltzmann, care a găsit în fizica teoretică căi cu totul noi. Cercetările lui Boltzmann au fost luate în zeflemea în timpul vieții lui de către tagma profesorilor conservatori, căci pe vremea aceea concepțiile atomice și moleculare erau considerate de mulți ca naive și neștiințifice. Boltzmann și-a pus singur capăt vieții și această atmosferă creată în jurul lui, fără îndoială, n-a jucat ultimul rol în sinuciderea lui.

Edificiul fizicii statistice a fost completat în mare măsură de lucrările eminentului fizician american Josiah Willard Gibbs (1839—1903). Gibbs a generalizat metodele lui Boltzmann și a arătat în ce mod se poate extinde abordarea statistică la toate corpurile.

Ultima lucrare a lui Gibbs a văzut lumina tiparului la începutul secolului al XX-lea. Cercetător foarte modest, Gibbs și-a tipărit lucrările în buletinul unei mici universități de provincie. Au trecut un număr bunicel de ani pînă cînd cercetările sale remarcabile să ajungă la cunoștința tuturor fizicienilor.

Fizica statistică arată calea pe care se pot calcula proprietățile corpurilor constînd dintr-un număr de particule dat. Desigur nu trebuie să se creadă că aceste metode de calcul sînt atotputernice. Dacă natura mișcării atomilor într-un corp este foarte complicată, așa cum este cazul în lichide, un calcul real devine practic irealizabil.

Puterea

Pentru a ne da seama de posibilitatea unei mașini de a efectua lucrul mecanic, precum și de consumul de lucru mecanic, ne servim de noțiunea de putere. Puterea este lucrul mecanic efectuat în unitatea de timp.

Există multe unități de măsură a puterii. În sistemul CGS unitatea de putere este ergul pe secundă (erg/s). Dar 1 erg/s este o putere infim de mică și deci incomodă pentru practică. O unitate de putere incomparabil mai răspîndită este unitatea din sistemul SI numită watt (W) care este egală cu un joule pe secundă (J/s). $1\ W = 1\ J/s = 10^7$ erg/s.

Dacă și această unitate este prea mică, ea se înmulțește cu o mie și se obține un kilowatt (kW).

Din timpuri vechi ne-a rămas moștenire o unitate de putere numită cal-putere (CP). Cîndva, la începutul dezvoltării tehnicii,

această denumire avea un sens profund. O mașină de 10 CP înlocuiește 10 cai — așa judeca cumpărătorul, chiar dacă nu avea idee de unitățile de putere.

Bineînțeles că un cal nu seamănă cu altul. Autorul primei unități de putere, pe cît se pare, credea că un cal „mediu" este capabil să efectueze într-o secundă un lucru mecanic de 75 kgf·m. Astfel s-a adoptat unitatea de 1 CP = 75 kgf·m/s.

Caii de povară pot efectua un lucru mecanic mare, în special în momentul pornirii din loc, dar puterea unui cal mijlociu este mai aproape de 1/2 CP.

Transformînd caii-putere în kilowați, obținem: 1 CP = 0,735 kW.

În practica de toate zilele și în tehnică întîlnim motoare de cele mai diferite puteri. Puterea unui motoraș de patefon este de 10 W, puterea unui motor de automobil „Volga" este de 75 CP = = 55 kW, puterea motoarelor avionului de pasageri IL-18 este de 16 000 CP. O centrală electrică mică are o putere de 100 kW. O centrală electrică mare, are o putere de ordinul milioanelor de kilowați.

Unitățile de putere cu care am făcut cunoștință sugerează încă o unitate de energie bine cunoscută pretutindeni unde sînt instalate contoare de energie electrică, și anume kilowattora (kWh). Un kilowattoră este lucrul mecanic efectuat în timp de o oră cu o putere de un kilowatt. 1 kWh = $3.6 \cdot 10^6$ J = 861 kcal = = 367 000 kgf · m. Cititorul ar putea întreba: nu cumva este necesară încă o unitate de energie? Și așa sînt destul de multe! Dar noțiunea de energie a pătruns în diferitele domenii ale fizicii și, gîndindu-se la avantajele pe care le prezentau pentru un anumit domeniu, fizicienii au introdus tot mereu alte unități de energie. În cele din urmă s-a ajuns la concluzia că este necesar să se introducă o unitate de energie unică pentru toate domeniile fizicii, ceea ce s-a și făcut în noul sistem internațional de unități SI (vezi pag. 14). Dar va mai trece mult timp pînă ce „vechile" unități vor ceda locul norocoasei alese și de aceea deocamdată kilowattora nu este încă ultima unitate de energie cu care va trebui să facem cunoștință în studiul fizicii.

Randamentul

Cu ajutorul diferitelor mașini se poate face ca sursele de energie să efectueze un lucru mecanic: să ridice greutăți, să miște mașini-unelte, să transporte materiale și persoane.

Se poate calcula cantitatea de energie introdusă într-o mașină și valoarea lucrului mecanic obținut de la ea. În toate cazurile valoarea la ieșire este mai mică decît valoarea la intrare; o parte din energie se pierde în mașină.

Fracțiunea de energie care se utilizează în mașină exclusiv pentru scopurile de care avem nevoie se numește randamentul mașinii. Valoarea randamentului se dă, de obicei, în procente.

Dacă randamentul este egal cu 90%, înseamnă că mașina pierde doar 10% din energie. Un randament de 10% înseamnă că mașina utilizează doar 10% din energia pe care o primește.

Dacă o mașină transformă în lucru mecanic o energie mecanică, în principiu, randamentul ei poate fi foarte mare. În acest caz, mărirea randamentului se obține prin combaterea frecărilor inevitabile. Mijloacele de a face randamentul să se apropie de unitate (de 100%) sînt: îmbunătățirea ungerii, introducerea de rulmenți mai perfecționați, micșorarea rezistenței din partea mediului în care are loc mișcarea etc.

De obicei, în cazul transformării energiei mecanice în lucru mecanic, ca etapă intermediară (ca la centralele hidroelectrice) se folosește o transmisie electrică. Bineînțeles că și aceasta este însoțită de anumite pierderi suplimentare, dar ele nu sînt mari, prin urmare pierderile prin transformarea energiei mecanice în lucru mecanic și cele datorate utilizării transmisiei electrice pot fi reduse la cîteva procente.

Pînă în momentul de față nu există nici o mașină funcționînd pe scară largă, care să transforme energia combustibilului direct în energie mecanică sau electrică. De aceea, este inevitabilă etapa transformării energiei chimice în energie calorică. Pentru a se obține lucru mecanic dintr-o substanță combustibilă, aceasta trebuie arsă și trebuie deci să se producă o temperatură înaltă într-un spațiu oarecare (cuptor). O mașină termică funcționează tocmai pe baza diferenței de temperatură dintre cuptor și mediul înconjurător. Mașina absoarbe o parte din fluxul de energie calorică și o transformă în lucru mecanic, dar numai o parte din flux; în nici un caz tot fluxul.

Dacă diferența de temperatură este mică, atunci se poate lua doar un mic șuvoi de energie, iar la temperatura mediului este cu totul imposibil să se absoarbă căldură de la sursă. Dacă diferența de temperatură este mare, se poate transforma în lucru mecanic o parte mult mai mare din fluxul de căldură.

Folosirea în mod util a energiei termice poate avea loc cu atît mai mult succes cu cît diferența de temperatură dintre sursa fluxului de căldură și mediul ambiant este mai mare.

Această diferență de temperatură impune o limită a posibilităților de perfecționare a unei mașini termice. Dacă s-ar suprima toate pierderile în mașină, dacă s-ar crea rulmenți ideali și s-ar utiliza materiale termoizolatoare și termoconductoare ideale existente în natură, randamentul totuși nu ar fi egal cu unitatea, ci ar atinge doar o valoare maximă oarecare. Această valoare maximă a randamentului transformării în lucru mecanic a fluxului de căldură care trece de la corpul cald cu temperatura T_1 la mediu, care se găsește la temperatura T_0 este egală cu

$$1 - \frac{T_0}{T_1}.$$

Astfel, dacă sursa fluxului de căldură are temperatura de 100°C, iar mediul are 20°C, randamentul maxim este egal cu 1—293/373, adică circa 20%. La o temperatură de 1 000°C a sursei, avem deja 76%.

Este clar că trebuie să se caute să se ardă combustibilul în așa fel, încît să se obțină o temperatură cît se poate mai înaltă.

Din cele de mai înainte se vede ce dezavantajoasă este folosirea fluxului de căldură pentru producerea de lucru mecanic. În cele mai bune turbine moderne cu gaz (vezi pag. 350) se reușește să se atingă un randament doar de aproximativ 45%. Cel mai bine ar fi dacă s-ar găsi mijlocul să se transforme energia chimică direct în lucru mecanic, fără a se mai trece prin energia termică. Știm că, în principiu, într-o astfel de transformare directă s-ar putea evita pierderile de energie, dar, după cum s-a mai spus, deocamdată tehnica n-a rezolvat această problemă.

Sursele de energie de pe Pămînt

Nu toate sursele de energie sînt la fel de valoroase. Unele prezintă doar un interes principial, iar de altele este legată existența însăși a civilizației. Unele surse sînt practic inepuizabile, pe cînd altele se vor termina în cursul următoarelor secole sau chiar decenii.

De cîteva miliarde de ani, Soarele, principalul protector al sistemului nostru planetar, trimite pe Pămînt radiațiile sale dătătoare de viață. Această sursă de energie se poate numi, fără teamă, inepuizabilă. Fiecare metru pătrat de suprafață a Pămîntului primește de la Soare o energie cu o putere medie de circa

1,5 kW; într-un an, aceasta reprezintă circa 10 milioane de kilocalorii de energie, o cantitate de căldură pe care o dau sute de kilograme de cărbune. Dar cîtă căldură primește de la Soare tot globul pămîntesc? Calculînd suprafața Pămîntului și ținînd seama de iluminarea neuniformă a ei de către Soare, obținem circa 10^{14} kW. Aceasta înseamnă de 100 000 de ori mai mult decît energia pe care o primesc de la toate sursele de energie de pe Pămînt toate fabricile, uzinele, centralele electrice și motoarele de automobil și avion sau, mai pe scurt, de 100 000 de ori mai mult decît puterea consumată de toată populația globului pămîntesc (de ordinul unui miliard de kilowați).

Cu toată mulțimea de proiecte existente însă energia solară se folosește în măsură cu totul neînsemnată. Este adevărat că calculul a dat o valoare enormă, dar această cantitate de energie cade în toate punctele suprafeței globului: și pe coastele munților inaccesibili, și pe suprafața oceanelor, care ocupă o mare parte din suprafața globului, și pe nisipurile deșerturilor nepopulate.

În afară de aceasta, cantitatea de energie care revine unei suprafețe mici nu este chiar atît de mare. Pe de altă parte nu ar fi de loc practic să se creeze receptoare de energie întinse pe kilometri pătrați. În sfîrșit, este evident că n-are sens să se transforme energia solară în căldură decît în locurile unde zilele însorite sînt numeroase.

Interesul față de utilizarea energiei Soarelui a crescut în ultimul timp datorită găsirii unor posibilități de a se transforma direct energia solară în energie electrică. O astfel de posibilitate este, natural, foarte atrăgătoare. Pînă acum, însă, ea a fost realizată doar într-o măsură cu totul neînsemnată.

Relativ de curînd s-a descoperit un acumulator de energie solară chiar deasupra capetelor noastre, în straturile superioare ale atmosferei. S-a constatat că oxigenul, la o înălțime de 150—200 km deasupra Pămîntului, se găsește, din cauza acțiunii radiației solare, în stare disociată: moleculele sale sînt disociate în atomi. Prin împreunarea acestor atomi în molecule de oxigen s-ar putea degaja o energie de 118 kcal/mol. Cît de mare este însă această rezervă de energie? Într-un strat cu o grosime de 50 km, la înălțimea indicată mai înainte, sînt înmagazinate 10^{13} kcal, adică atîta cît se pune în libertate prin arderea completă a cîtorva milioane de tone de cărbune. În U.R.S.S., această cantitate de cărbune se extrage în cîteva zile. Deși energia oxigenului disociat la mari înălțimi se reînnoiește neîncetat, și în acest caz ne lovim de problema concentrației reduse; de aceea nu este atît de ușor de născocit un dispozitiv pentru utilizarea practică a acestei energii

Să ne întoarcem la analiza surselor de energie. Masele de aer ale atmosferei terestre se găsesc în continuă mișcare. Cicloanele, furtunile, vînturile alizee care suflă fără încetare, brizele ușoare sînt manifestări sub diferite forme ale energiei curenților de aer. Energia vîntului a fost folosită pentru mișcarea corăbiilor cu pînze și la morile de vînt încă din vechime. Puterea totală medie anuală a curenților de aer de pe tot Pămîntul este egală, nici mai mult nici mai puțin, cu 100 de miliarde de kilowați.

Nu se pune însă mare nădejde în vînt, ca sursă de energie, cu atît mai mult cu cît această sursă nu este sigură — cîte nenorociri și dezamăgiri n-au adus acalmiile vîntului în epoca corăbiilor cu pînze! — și are același defect ca și energia solară: cantitatea de energie care se degajează pe unitatea de suprafață este relativ mică. Paletele unei turbine de vînt (dacă s-ar construi o astfel de mașină pentru producerea de energie pe scară industrială) ar trebui să atingă dimensiuni irealizabile în practică. Un neajuns nu mai puțin important este faptul că forța vîntului nu este constantă. De aceea, energia vîntului sau, cum se numește poetic, a cărbunelui albastru, se folosește numai la motoarele mici, zise „eoliene". În timpul vîntului, ele dau energie electrică mașinilor agricole și luminează casele. Dacă se produce un surplus de energie, el se înmagazinează în acumulatoare (așa se numesc aparatele care depozitează energia electrică). Aceste surplusuri se pot utiliza în timp de acalmie. Firește că nu ne putem bizui pe motorul eolian care poate juca doar rolul de motor auxiliar.

O sursă gratuită de energie este și apa în mișcare — fluxul oceanelor, care năvălește neîncetat pe uscat, și curenții rîurilor care curg spre mări și oceane.

Puterea tuturor rîurilor globului pămîntesc se ridică la miliarde de kilowați, dar se utilizează aproximativ doar 40 de milioane de kilowați, adică deocamdată circa 1%. Puterea potențială a rîurilor din U.R.S.S. atinge 400 milioane de kilowați, dar se utilizează pînă acum numai circa 20 de milioane de kilowați.

Dacă am fi lipsiți de cărbune, petrol și de celelalte surse de energie și am recurge numai la cărbunele alb — energia rîurilor — utilizînd în întregime această energie (presupunînd că s-ar fi construit toate centralele hidroelectrice posibile pe toate rîurile de pe glob) ar trebui să se reducă consumul de energie al omenirii. În prezent, consumul de energie pe globul pămîntesc depășește valoarea de un miliard de kilowați, așa că energia hidraulică existentă de abia ar ajunge pentru nevoile actuale ale omenirii.

Bine, dar mareele? Energia lor este foarte însemnată, deși e de aproximativ zece ori mai mică decît energia rîurilor. Dar această energie este deocamdată utilizată doar într-o măsură cît se poate de redusă: caracterul pulsator al mareelor îngreuiază folosirea lor. Totuși inginerii sovietici și francezi au găsit modalități practice de a învinge această dificultate. Acum o centrală electrică utilizînd energia mareelor poate asigura furnizarea unei puteri garantate în orele de consum maxim. În Franța s-a construit și funcționează centrala electrică experimentală de la Saint Malo, iar în U.R.S.S. se construiește o centrală în golful Kislaia din raionul Murmansk. Această ultimă centrală va servi scopurilor experimentale pentru construirea centralelor puternice de maree proiectate în golfurile Lumbov și Mezen din Marea Albă. În Franța se va da în funcțiune în 1965 o centrală de maree cu o putere de 240 000 kW.

Apa din oceane are la adîncimi mari o temperatură care diferă cu 10—20° de temperatura straturilor superficiale. Așadar, se poate construi o mașină termică al cărei încălzitor la latitudinile mijlocii să fie stratul superior de apă, iar răcitorul să fie stratul de la adîncime. Randamentul unei astfel de mașini ar fi de 1—2%. Dar și aceasta, firește, este o sursă foarte neconcentrată de energie.

Soarele, aerul și apa sînt surse gratuite de energie[1]. Ele sînt gratuite în sensul că utilizarea energiei lor nu atrage după sine micșorarea rezervelor de alte bunuri prețioase pămîntești. Funcționarea motoarelor eoliene nu micșorează cantitatea de aer de pe glob, funcționarea centralelor hidroelectrice nu face să scadă adîncimea rîurilor, iar prin funcționarea mașinilor solare nu se consumă rezervele de substanțe de pe Pămînt.

În acest sens, sursele de energie descrise pînă acum au un mare avantaj față de combustibil. Combustibilul se arde și deci utilizarea energei huilei, petrolului sau lemnului înseamnă distrugerea ireversibilă a unor valori pămîntești. Ar fi foarte ademenitor să se realizeze un motor fotochimic, adică să se obțină energie cu ajutorul mecanismului fotosintezei, care să asigure acumularea de energie sub formă de combustibil. Frunza verde a oricărei plante este o uzină care din moleculele de apă și de bioxid de carbon fabrică, datorită energiei radiațiilor solare, substanțe organice cu mare rezervă de energie în molecule. Acest proces care are loc în plante are un randament mic (~1%), dar cu toate acestea, energia acumulată anual de plante este egală cu 2×10^{15} kWh, adică

[1] Desigur că Soarele nu poate fi pus pe picior de egalitate cu celelalte surse de energie. În definitiv, toată energia provine de la Soare.

depășește de sute de ori producția anuală de energie a tuturor centralelor electrice din lume. Mecanismul sintezei n-a fost încă descifrat complet, dar nu există îndoială că în viitor se va reuși nu numai să se realizeze fotosinteza în condiții artificiale, ci să se și mărească totodată randamentul ei. În acest domeniu, omul deocamdată nu poate concura cu natura și este silit să se folosească de darurile ei, arzînd lemne, petrol și cărbuni.

Ce rezerve de combustibil există însă pe globul pămîntesc? Dintre combustibilii obișnuiți, adică aceia care ard cînd li se dă foc, fac parte cărbunele și petrolul. Rezervele de acești combustibili sînt extrem de mici. La consumul actual de petrol, rezervele explorate se vor termina pe la începutul mileniului următor. Rezervele de huilă sînt ceva mai mari. Cantitatea de cărbuni de pe Pămînt se cifrează la zece mii de miliarde de tone. Un kilogram de cărbune dă prin ardere 7000 kcal de căldură. Așadar, rezervele totale de energie sub formă de cărbune se ridică la o valoare de ordinul a 10^{20} kcal. Această valoare este de o mie de ori mai mare decît consumul anual de energie.

O rezervă de energie pentru o mie de ani trebuie considerată ca foarte mică. O mie de ani este mult numai în comparație cu durata vieții omului, dar viața omului este o clipită în comparație cu viața globului pămîntesc și cu timpul de cînd există lumea civilizată. În afară de aceasta, consumul de energie pe locuitor crește neîncetat. De aceea, dacă rezervele de carburanți s-ar reduce la petrol și la cărbune, situația rezervelor energetice de pe Pămînt ar trebui să fie considerată catastrofală.

Curînd după anul 1940 s-a demonstrat posibilitatea practică de a se utiliza un fel cu totul nou de combustibil, combustibilul nuclear, din care există rezerve considerabile.

Nu este aici locul să insistăm asupra structurii atomului și a nucleului atomic, nici asupra modului cum se poate extrage energia internă din nucleele atomice. Degajarea energiei nucleare se poate realiza numai pe scară mare, în așa-numite centrale atomoelectrice. Energia nucleară se degajează sub formă de căldură, care se utilizează absolut la fel ca în centralele electrice care funcționează cu huilă.

În prezent putem extrage energie în cantități industriale din două elemente — din uraniu și toriu. O particularitate a combustibilului nuclear, particularitate care constituie principala lui calitate, este concentrarea extraordinară a energiei. Un kilogram de combustibil nuclear cedează o energie de 2,5 milioane de ori mai mare decît un kilogram de huilă. De aceea, cu toate că aceste elemente sînt relativ puțin răspîndite, rezervele lor pe globul

pămîntesc, exprimate în energie, sînt destul de însemnate. Calcule aproximative arată că rezervele de combustibil nuclear sînt mult mai mari decît rezervele de cărbune. Dar adăugarea uraniului și toriului la ceilalți combustibili nu rezolvă problema principală a eliberării omenirii de foamea de energie, căci rezervele de minerale din scoarța pămîntului sînt limitate.

Se poate însă indica încă de pe acum o sursă de energie în adevăr nelimitată. Este vorba de așa-numitele reacții termonucleare. Ele sînt posibile numai la temperaturi supraînalte de ordinul a douăzeci de milioane de grade. Deocamdată, această temperatură se atinge numai în timpul exploziilor atomice.

Acum cercetătorii au de rezolvat problema obținerii unor temperaturi înalte pe altă cale decît aceea a exploziilor și primele încercări de a atinge temperatura de un milion de grade au fost încununate de succes.

Dacă fizicienii vor ajunge să lucreze cu temperaturile necesare de zeci de milioane de grade obținute pe altă cale decît a exploziei, va deveni posibilă reacția dirijată de fuziune a nucleelor de hidrogen (ea poartă chiar numele de reacție termonucleară). În timpul acestei reacții se degajează o cantitate enormă de energie pe kilogramul de combustibil. Pentru a se asigura omenirea cu energie pe un an va fi suficient să se obțină energie termonucleară prin „prelucrarea" a vreo zece milioane de tone de apă.

În oceane este înmagazinată atîta energie nucleară încît ar ajunge pentru satisfacerea întregului necesar de energie al omenirii pe o perioadă de timp care depășește vîrsta sistemului solar. Iată deci o sursă de energie în adevăr nelimitată.

Motoarele

Omul care trăiește în secolul al XX-lea este obișnuit să se folosească de diferite motoare, care execută în locul lui o muncă enormă, îi ușurează munca și îi înzecește forțele.

Și în timpul de față în agricultura multor țări se mai folosesc încă mori de vînt. Acest motor extrem de simplu, care utilizează energia vîntului, este în slujba omului de multe veacuri. Aripile acestui motor sînt plane. Ele sînt așezate sub un anumit unghi față de direcția vîntului. Curentul de aer lovindu-se de aripile așezate în cerc învîrtesc roata morii.

Se înțelege că motorul eolian este reversibil: dacă un motor oarecare l-ar învîrti, aripile ar refula un curent puternic de aer în

lungul axei de rotație. Dacă un astfel de sistem este instalat pe un hidroglisor, pe un avion sau pe un elicopter, spunem că avem de-a face cu o elice aeriană. Reacția curentului de aer refulat de elice trage hidroglisorul sau avionul și creează forța de susținere a elicopterului.

După cît se pare, primul motor folosit de om pentru nevoile sale a fost turbina hidraulică sub forma ei cea mai primitivă de roată hidraulică.

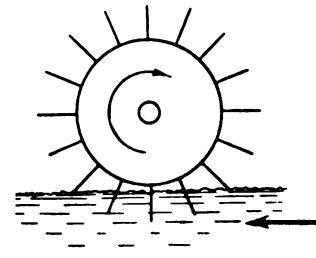


FIG. 133

În fig. 133 este reprezentată o roată hidraulică. Lovindu-se de aripile cufundate în apă ale roții, curentul de apă îi cedează o parte din energia sa cinetică. Aripile încep să se miște. Întrucît ele sînt solidare cu roata, aceasta începe să se învîrtească. Se vede însă imediat că în fiecare moment poate să se găsească perpendicular pe curent numai o aripă. Celelalte aripi formează unghiuri ascuțite cu curentul care lovește în ele, primind de la el mai puțină energie decît aripa perpendiculară. Randamentul unei astfel de roți este redus. Mijlocul de a-l face mai mare este evident: trebuie să se facă în așa fel, încît toate aripile roții să stea perpendicular pe curentul care le lovește. Această idee se poate realiza cu ajutorul unui aparat director. Din fig. 134 rezultă că totodată, pentru ca turbina să funcționeze cu succes, este necesar să existe o diferență de nivel a apei. Ajungem astfel la schema unei centrale hidroelectrice moderne, al cărei baraj înalt aruncă cu o forță colosală masele de apă asupra paletelor turbinei. Executate la un înalt nivel al artei inginerești, turbinele hidraulice se proiectează pentru puteri care depășesc 100 000 kW și au un randament de 95%. Întrucît aceste puteri se generează la turații destul de mici (de ordinul a 100 de rotații pe minut), turbinele hidraulice care se construiesc în prezent

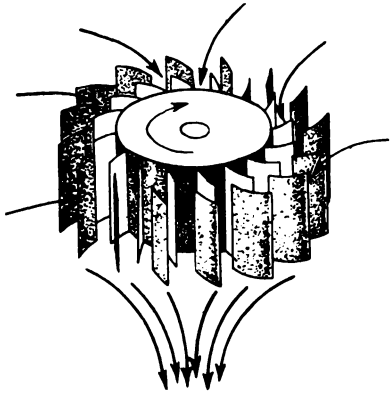


FIG. 134

uimesc prin dimensiunile și greutatea lor. Astfel, rotorul turbinei centralei hidroelectrice „Lenin" de pe Volga are diametrul de 10 m și greutatea de 420 t.

Un avantaj important al turbinei este simplitatea extraordinară a transformării mișcării de translație a apei în mișcare de rotație. De aceea, acest principiu se utilizează pe scară largă la motoare, care la exterior nu seamănă de loc cu roțile hidraulice. Dacă asupra paletelor apasă aburul, avem de-a face cu o turbină cu abur. Știm deja că pentru mărirea randamentului este necesar să se ridice temperatura agentului de lucru. La centralele termoelectrice moderne se introduce în turbine abur avînd o temperatură de 580° și o presiune de 240 atm. Limita teoretică a randamentului unei astfel de turbine, dacă se consideră că răcitorul are o temperatură de 20°C, este de 66%. În practică se atinge un randament de 42%. Așadar, turbinele cu abur sînt motoare moderne bune. Ele au o putere pînă la 300 000 kW în aceeași instalație. O astfel de turbină consumă peste 900 t de abur de înaltă presiune pe oră. Dar obținerea unor astfel de cantități de abur este o problemă tehnică complicată. Cazanele de abur de înaltă presiune și sistemul de preparare și alimentare cu combustibil ocupă o mare parte din volumul unei centrale termoelectrice moderne. De aceea, în industria transporturilor, turbinele cu abur se folosesc numai pe navele mari.

În ultimii ani a început să apară în presă expresia „navă turboelectrică". Înțelesul acestei denumiri se explică simplu: pe o astfel de navă, aburul pune în mișcare niște turbine, acestea, la rîndul lor, pun în mișcare niște generatoare puternice de curent continuu, iar elicele sînt montate pe arborii unor motoare electrice. Oare această complicație nu este de prisos? De ce nu s-ar monta elicea direct pe arborele turbinei? Aici ne lovim de o nouă problemă, aceea a caracteristicii de tracțiune a motorului.

În adevăr, turbina cu abur dezvoltă puterea maximă numai la o turație strict determinată. Astfel, turbinele puternice ale centralelor noastre electrice fac 3 000 de rotații pe minut. Dacă se micșorează turația, puterea scade. Dacă elicele ar fi montate direct pe arborii turbinelor, vasul înzestrat cu o astfel de instalație de forță ar avea calități slabe de mers. Motorul electric de curent continuu însă are o caracteristică ideală de tracțiune: cu cît rezistența este mai mare, cu atît el dezvoltă un efort de tracțiune mai mare, un astfel de motor putînd da o putere mare la o turație mică în momentul pornirii din loc.

Așadar, generatorul și motorul de curent continuu care se găsesc între turbină și elicea unei nave turboelectrice joacă rolul de cutie de viteze automată fără trepte, avînd un grad mare de

perfecțiune. S-ar părea că acest sistem este prea voluminos, dar cînd este vorba de puterile mari ale navelor turboelectrice moderne, orice alt sistem ar fi tot atît de voluminos, dar mai puțin satisfăcător.

Actuala instalație a unei nave turboelectrice se poate perfecționa considerabil sub alt aspect: este cît se poate de avantajos să se înlocuiască cazanele voluminoase de aburi cu un reactor atomic. În acest caz se realizează o economie enormă de spațiu (ocupat de combustibilul care trebuie luat în cursă).

Primul spărgător de gheață atomic sovietic „Lenin", este cunoscut în toată lumea. Puterea motoarelor sale este de 44 000 CP, iar deplasamentul său este de 16 000 t. Instalația nucleară de forță a acestei nave turboelectrice asigură o autonomie de navigație de peste un an.

Așadar, turbina cu aburi are nevoie de o sursă străină puternică de flux de căldură. Fie că este vorba de focarul unui cazan de abur sau de un reactor cu uraniu, la nivelul actual al tehnicii, aceste surse au greutate și dimensiuni atît de mari, încît instalarea unei turbine cu abur pe un automobil sau avion este absolut nepractică; în adevăr, greutatea totală a motorului și a încălzitorului calculată pe un cal putere ar fi mult prea mare. Nu s-ar putea oare să se renunțe la încălzitorul străin și să se amplaseze în interiorul turbinei?

O astfel de instalație există și se folosește deja pe scară largă. Este vorba de turbina cu gaze. La această turbină, agentul de lucru îl constituie produsele incandescente de ardere ale combustibilului cu mare putere calorică. De aici rezultă și avantajele importante ale turbinei cu gaze față de cea cu aburi și marile dificultăți tehnice pe care le întîmpină funcționarea sigură a acesteia.

Avantajele sînt evidente: camera de ardere a combustibilului are dimensiuni mici și poate fi instalată sub carcasa turbinei, iar produsele de ardere a amestecului combustibil — constînd, de exemplu, din petrol lampant pulverizat și oxigen — au o temperatură imposibil de atins la abur. Fluxul de căldură care se formează în camera de ardere a turbinei cu gaze este foarte intens, ceea ce permite să se obțină un randament mare.

Dar aceste avantaje se transformă în dezavantaje. Paletele de oțel ale turbinei lucrează într-un curent de gaze avînd o temperatură pînă la 1 200°C și saturate inevitabil cu particule microscopice de cenușă. Este ușor de imaginat ce condiții grele trebuie să îndeplinească materialele din care se construiesc turbinele cu gaze. Cînd s-a încercat, însă, să se proiecteze o turbină cu gaze cu o putere de circa 200 CP pentru un automobil de turism, s-a întîm-

pînat o dificultate de un gen cu totul special: turbina a rezultat de dimensiuni atît de mici încît soluțiile inginerești obișnuite și materialele curente n-au mai putut fi folosite de loc. Dificultățile tehnice sînt, însă, pe cale de a fi învinse și primele automobile experimentale cu turbină cu gaze sînt în curs de încercare.

A fost mai ușor de folosit turbina cu gaze la transportul feroviar. Locomotivele cu turbine cu gaze au căpătat deja „drept de cetățenie".

Drumul turbinei cu gaze a fost, însă, larg deschis de cu totul alte motoare, la care turbina cu gaze, deși necesară, este totuși o parte componentă subordonată. Este vorba de motorul turboreactor, tipul principal de motor în aviația cu reacție în prezent.

Principiul motorului cu reacție este extrem de simplu. Într-o cameră de ardere rezistentă se arde un amestec combustibil; produsele de ardere avînd o viteză extraordinar de mare (3000 m/s cînd se arde hidrogen în oxigen și ceva mai puțin la alte feluri de combustibil) sînt expulzate printr-un ajutaj care se lărgește progresiv, în sens opus mișcării motorului. La aceste viteze, chiar cantități mici de produse de ardere scot din motor un impuls puternic.

Prin crearea motoarelor cu reacție, oamenii au căpătat posibilitatea reală de a efectua zboruri între planete.

Foarte mult s-au răspîndit motoarele cu reacție cu combustibil lichid. În camera de ardere a unui astfel de motor se injectează anumite porții de combustibil (de exemplu, alcool etilic) și de oxidant (de obicei oxigen lichid). Amestecul arde, producînd tracțiune. La rachetele de mare altitudine, de tip V-2, tracțiunea are o valoare de ordinul a 15 t. În această rachetă se introduc 8,5 t de combustibil și oxidant, care ard în 1,5 min. Aceste valori sînt destul de elocvente. Motoarele cu reacție cu combustibil lichid sînt raționale numai pentru zborurile la mari altitudini sau dincolo de atmosfera terestră. Nu are sens să se introducă cantități mari de oxidant special într-un avion destinat zborurilor în straturile inferioare ale atmosferei (pînă la 20 km), unde se găsește destul oxigen. Atunci însă, se pune problema comprimării în camera de ardere a unor cantități enorme de aer necesare pentru arderea intensă. Această problemă se rezolvă în următorul mod natural: o parte din energia jetului de gaze creat în camera de ardere se deviază pentru a roti un compresor puternic, care refulează aerul în cameră.

Am spus cu ajutorul cărui motor se poate efectua lucru mecanic pe seama energiei unui jet de gaze incandescente; este vorba, firește, de turbina cu gaze. Întregul sistem se numește motor turboreactor

(fig. 135). Motoarele turboreactoare nu au rival în cazul zborurilor cu viteze de la 800 pînă la 1 200 km/h.

Pentru zborurile la distanțe mari cu viteze de 600—800 km/h, pe arborele motorului turboreactor se instalează în plus o elice obișnuită de avion. Acesta este motorul turbopropulsor.

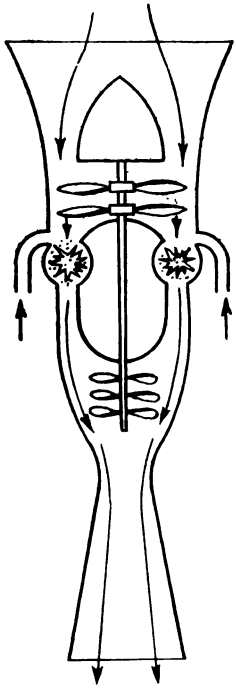


FIG. 135

La viteze de zbor de circa 2 000 km/h sau mai mari, presiunea aerului în care pătrunde avionul este atît de mare încît nu mai este nevoie de compresor. Atunci, natural, nu mai este necesară nici turbina cu gaze. Motorul se transformă într-un tub cu secțiune variabilă într-un punct riguros determinat, în care se produce arderea combustibilului. Acesta este motorul statoreactor cu eșichierent. Acest motor nu

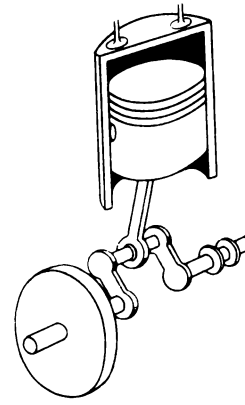


FIG. 136

poate ridica avionul de pe suprafața Pămîntului; el poate să funcționeze numai la viteze de zbor foarte mari.

În zborurile cu viteze mici, motoarele cu reacție sînt absolut nerentabile din cauza consumului mare de carburant.

În mișcarea pe sol, pe apă sau în aer cu viteze de la zero pînă la 500 km/h, îl servesc pe om cu credință motoarele cu ardere internă cu piston, cu benzină sau diesel. După cum le arată și numele, piesa principală a unui astfel de motor este un cilindru în interiorul căruia se deplasează un piston. Mișcarea alternativă de translație a pistonului se transformă în mișcarea de rotație a arborelui cu ajutorul unui sistem bielă-manivelă (fig. 136).

Mișcarea pistonului se transmite prin bielă la manivelă, care este o parte a arborelui cotit. Mișcarea manivelei provoacă rotația arborelui. Invers, dacă se învîrtește arborele cotit, se provoacă mișcarea alternativă a bielelor și deplasarea pistoanelor în interiorul cilindrilor.

Cilindrul unui motor de benzină este prevăzut cu două supape, una destinată admisiei amestecului carburant, iar cealaltă evacuării gazelor arse. Pentru ca motorul să înceapă să funcționeze, el trebuie învîrtit, folosindu-se energia dată de o sursă străină oarecare. Să presupunem că la un moment dat pistonul se deplasează în jos, iar supapa de admisie este deschisă. În cilindru se aspiră un amestec de benzină pulverizată și aer. Supapa de admisie este cuplată cu arborele motorului în așa fel, încît se închide în momentul în care pistonul ajunge în poziția extremă inferioară. Arborele continuînd să fie învîrtit, pistonul va merge în sus. Mecanismul automat de acționare a supapelor le menține închise în timpul acestei curse și de aceea amestecul carburant se comprimă. Cînd pistonul se găsește în poziția de sus, amestecul comprimat este aprins de o scînteie electrică care sare între electrozii bujiei. Amestecul explodează, produsele de ardere care se destind lucrează și împing pistonul în jos. Arborele motorului primește un impuls puternic, iar volantul fixat pe arbore acumulează o energie cinetică considerabilă. Datorită acestei energii au loc toți cei trei timpi pregătitori următori: mai întîi evacuarea, cînd supapa de evacuare este deschisă, iar pistonul merge în sus, refulînd gazele arse afară din cilindru, apoi aspirația, pe care o cunoaștem deja, și după aceea o nouă explozie. Motorul a început astfel să funcționeze.

Motoarele cu benzină au o putere de la o fracțiune de cal-putere pînă la 4 000 CP, un randament pînă la 40% și o greutate pe cal-putere pînă la 300 g.

Acești indici superiori explică folosirea lor pe scară largă la automobile și avioane.

În ce mod s-ar putea mări randamentul motoarelor cu benzină? Principalul mijloc constă în mărirea gradului lor de compresiune. Răcitorul la toate motoarele termice folosite în transporturi este aerul înconjurător. De aceea, randamentul se poate mări numai prin ridicarea temperaturii amestecului de lucru și, în acest scop, amestecul trebuie comprimat cît se poate mai puternic înainte de a se aprinde. Dar în acest caz se ivește o complicație serioasă: un amestec comprimat puternic detonează (vezi pag. 329). Cursa activă capătă caracterul unei explozii puternice, care poate avaria motorul. Trebuie să se ia măsuri speciale care să micșoreze pro-

prietățile detonante ale benzinei, iar acest lucru face să se scumpească combustibilul, care și așa nu este prea ieftin (vezi pag. 330).

Problemele în legătură cu ridicarea temperaturii în timpul cursei active, cu suprimarea detonației și ieftinirea combustibilului au fost rezolvate cu succes de motorul diesel.

Din punct de vedere al construcției, motorul diesel seamănă cu cel cu benzină, dar este calculat pentru produse de distilare a petrolului mai ieftine și de calitate inferioară benzinei. Ciclul începe cu aspirația de aer pur în cilindru. Apoi aerul este comprimat de piston aproximativ la 20 atm. Ar fi foarte greu să se obțină această compresiune puternică prin învîrtirea motorului cu mîna. De aceea, motorul diesel se pornește cu ajutorul unui motor special de pornire, de obicei cu benzină sau cu ajutorul aerului comprimat.

Din cauza compresiunii puternice, temperatura aerului din cilindru se ridică atît de mult, încît devine suficientă pentru aprinderea amestecului carburant. Dar cum poate fi el introdus în cilindru, unde domnește o presiune înaltă? Aici nu poate fi folosită o supapă de admisie. Ea se înlocuiește printr-un injector cu orificiu foarte mic prin care se refulează combustibilul în cilindru. El se aprinde pe măsură ce pătrunde în acesta, astfel că pericolul de detonație, care este foarte serios la motorul cu benzină, dispare. Înlăturarea pericolului de detonație permite să se construiască motoare diesel cu turație mică pentru nave, și cu o putere de multe mii de cai putere. Natural că aceste motoare au dimensiuni foarte mari, dar rămîn totuși mai puțin voluminoase decît un agregat alcătuit din cazan de abur și turbină. Navele înzestrate cu motoare diesel se numesc în literatură, fără prea multă logică, motonave.

O navă la care între motorul diesel și elice se găsește un generator și un motor de curent continuu se numește „navă diesel-electrică". Locomotivele cu motor diesel, care acum s-au introdus pe scară largă în transporturile feroviare, sînt construite după aceeași schemă și de aceea se pot numi „locomotive diesel-electrice".

Motoarele cu ardere internă cu piston au împrumutat principalele lor elemente constructive — cilindru, piston, mișcarea de rotație obținută cu ajutorul mecanismului bielă-manivelă — de la mașina cu abur, care în prezent iese treptat din scenă. Mașina cu abur ar putea fi numită „motor cu ardere externă cu piston". Tocmai această asociere a unui cazan voluminos de abur cu un nu mai puțin voluminos sistem de transformare a mișcării de translație în mișcare de rotație răpește mașinii cu abur posibili-

tatea de a rivaliza cu succes cu motoarele mai perfecționate. Pentru a ne convinge de acest lucru, să urmărim cum funcționează o mașină cu abur cu dublu efect.

Aburul trece din cazan în cutia de distribuție, în interiorul căreia se deplasează un sertăraș (o supapă de formă specială). Sertărașul este cuplat, prin intermediul unui sistem de pîrghii, cu pistonul în așa fel încît se deplasează prin impulsuri, deschizînd alternativ accesul aburului cînd într-o parte a cilindrului, cînd în cealaltă. Așadar, în orice moment se găsește în cilindru abur sub presiune mare. S-ar părea că mașina cu abur este mai bună decît motorul cu benzină, căci ea nu are curse pregătitoare, fiecare cursă a ei fiind activă, dar acest raționament superficial este absolut fals.

Să nu se uite că randamentul satisfăcător al motorului cu benzină se datorește temperaturii înalte a gazelor care împing pistonul. Noi știm că pentru mărirea randamentului turbinei cu abur se folosește abur de înaltă presiune, avînd o temperatură atît de mare încît conductele de abur și paletele se încălzesc la roșu. Dar paletele turbinei se rotesc liber, fără a se freca de o suprafață metalică. Închipuiți-vă ce dificultăți ar avea de învins un visător, care ar intenționa să „îmbunătățească" mașina cu abur, obligînd pistonul încălzit la roșu să alunece în interiorul cilindrului tot așa de incandescent, în care timp pistonul ar trebui să se aplice așa de strîns pe cilindru, încît să împiedice scăderea presiunii de ordinul a 600 atm. Chiar dacă s-ar face minuni de inventivitate și s-ar construi o astfel de mașină, randamentul ei ar fi totuși mai mic decît al unei turbine cu aburi avînd aceiași parametri, deoarece rotația se produce în aceasta din urmă în mod mult mai simplu, iar dimensiunile și greutatea sînt mai mari decît la un motor similar cu ardere internă.

Mașinile moderne cu abur au un randament de circa 10%. Locomotivele cu abur, scoase acum din fabricație, aruncau pe coș fără nici un folos pînă la 95% din combustibilul ars de ele.

Acest randament scăzut „record" se explică prin înrăutățirea inevitabilă a calităților cazanului destinat a fi instalat pe locomotivă în comparație cu cazanul staționar de aburi.

De ce însă mașinile cu abur au avut atîta vreme o întrebuințare așa de largă în transporturi? În afară de atașamentul la soluțiile tradiționale, a jucat un rol și faptul că mașina cu abur are o caracteristică bună de tracțiune: cu cît sarcina se opune cu o forță mai mare deplasării pistonului, cu atît aburul apasă mai tare asupra acestuia, adică cuplul dezvoltat de mașina cu

abur crește în condiții grele, ceea ce este foarte important în transporturi. Bineînțeles însă că faptul că mașina cu abur nu are nevoie de un sistem complicat de transmisie variabilă la osiile motoare nu compensează nicidecum defectul ei fundamental — randamentul redus.

Așa se explică înlocuirea mașinii cu abur de către alte motoare.

Fluctuațiile

Să revenim la al doilea principiu al termodinamicii, la marea lege a naturii care dirijează cursul fenomenelor naturii. Am văzut că procesele de sine stătătoare conduc un sistem la starea cea mai probabilă — la creșterea entropiei. După ce entropia sistemului a devenit maximă, încetează orice variație ulterioară în sistem, adică se ajunge la starea de echilibru.

Starea de echilibru nu înseamnă însă nicidecum repaus intern. În interiorul sistemului are loc o mișcare termică intensă. De aceea, riguros vorbind, orice corp fizic, în orice moment, „nu mai este el însuși", adică poziția reciprocă a moleculelor este în fiecare clipă următoare alta decît în cea precedentă. Așadar, valorile tuturor mărimilor fizice se mențin „în medie", dar nu sînt strict egale cu valorile lor cele mai probabile, ci oscilează în jurul lor. Abaterea de la valorile de echilibru cele mai probabile se numește fluctuație. Mărimea diferitelor fluctuații este extrem de neînsemnată. Cu cît o fluctuație este mai mare, cu atît ea este mai puțin probabilă.

Valoarea medie a fluctuațiilor relative, adică a fracțiunii din mărimea fizică care ne interesează, cu care această mărime poate varia datorită mișcării termice haotice a moleculelor, poate fi exprimată aproximativ prin expresia $1/\sqrt{N}$, în care N este numărul de molecule ale corpului studiat sau ale unei porțiuni din el. Așadar, fluctuațiile sînt sensibile la sistemele constînd dintr-un număr mic de molecule și sînt cu totul insesizabile la corpurile mari conținînd miliarde de miliarde de molecule.

Formula $1/\sqrt[4]{N}$ arată că, într-un centimetru cub de gaz, densitatea, presiunea, temperatura, precum și orice alte proprietăți pot varia cu fracțiunea $\frac{1}{\sqrt{3 \cdot 10^{19}}}$, adică aproximativ cu 10^{-8} %. Astfel de fluctuații sînt prea mici pentru a putea fi detectate prin experiență.

Cu totul altfel stau însă lucrurile într-un volum de un micron cub. Aici $N = 3 \cdot 10^7$, iar fluctuațiile ating valori măsurabile de ordinul sutimilor din 1%.

Fluctuația reprezintă un fenomen „anormal", în sensul că are ca rezultat trecerea de la o stare mai probabilă la alta mai puțin probabilă. În timpul fluctuației, căldura trece de la un corp mai rece la altul mai cald, distribuția uniformă a moleculelor dispare și apare o mișcare ordonată.

Nu cumva, pe baza acestor modificări, s-ar putea construi un perpetuum mobile de speța a doua?

Să ne închipuim, de exemplu, o turbină extrem de mică, care s-ar găsi într-un gaz rarefiat. Nu s-ar putea, oare, face un aranjament de așa natură încît această mașină mică să răspundă la toate fluctuațiile de același sens, de exemplu, să se rotească dacă numărul de molecule care se deplasează spre dreapta devine mai mare decît numărul de molecule care se mișcă spre stînga? Aceste impulsuri foarte mici s-ar putea aduna și, în cele din urmă, s-ar produce un lucru mecanic. În acest caz, principiul imposibilității realizării unui perpetuum mobile de speța a doua ar fi răsturnat.

Un asemenea dispozitiv este principial imposibil. O analiză amănunțită, ținînd seamă de faptul că mica turbină are fluctuațiile sale proprii cu atît mai mari cu cît dimensiunile sale sînt mai mici, arată că fluctuațiile nu pot în nici un caz produce lucru mecanic. Deși cazuri de dispariție a tendinței spre echilibru se ivesc neîncetat în jurul nostru, ele nu pot modifica mersul implacabil al proceselor fizice, care are loc în sensul măririi probabilității stării, adică a entropiei.

Entropia și dezvoltarea universului

Rîurile curg la vale, pietrele se rostogolesc de pe munți, mișcarea se oprește din cauza frecării — toate mișcările relative încetează. Corpurile calde se răcesc, iar cele reci se încălzesc — temperaturile tuturor corpurilor din lume se egalizează. Acesta este mersul ireversibil al evenimentelor în lumea care ne înconjură, din punctul de vedere al legii creșterii entropiei.

S-ar părea că totul este limpede. Totuși, dacă ne gîndim bine, există aici un punct nelămurit. Dacă natura tinde spre echilibru, se pune întrebarea: de ce nu s-a stabilit încă echilibrul?

În adevăr, chiar dacă un sistem este extrem de nestabil, timpul de trecere în stare de echilibru (fizicienii numesc acest timp,

timpul de relaxare) nu poate fi infinit de mare. Trecerea universului la starea de echilibru ar putea dura mult, să zicem multe miliarde de ani, dar în orice caz trecerea de la o stare oarecare de dezechilibru la starea de echilibru ar ocupa un anumit interval de timp, dar nu ar dura la nesfîrșit.

De ce acest echilibru nu a fost atins acum un miliard de ani sau chiar un miliard de miliarde de ani?

Această contradicție este foarte serioasă. Rezultă că însăși existența lumii noastre, așa cum o vedem, se găsește în contradicție ireconciliabilă cu legile fizicii cunoscute de noi.

Nu s-ar putea oare ieși din încurcătură dacă s-ar admite că tot universul este o fluctuație gigantică? Lumea este infinită în timp și în spațiu. Cînd ici, cînd colo apare cîte o fluctuație — moleculele se unesc între ele, mișcarea lor devine ordonată, se creează, de exemplu, un sistem planetar asemănător cu al nostru. După aceasta, fluctuația se resoarbe, dispare, dar în schimb apare în altă parte a lumii altă fluctuație.

Dar oricît de ispititoare ar fi o asemenea ipoteză, ea nu rezistă la o critică simplă. Am văzut că îngrămădirea de la sine a moleculelor într-o jumătate a unui vas cu dimensiunile de un centimetru cub este un caz dintr-un număr colosal de cazuri. Atunci ce să mai spunem de fluctuația care a dat naștere universului vizibil!

Această explicație este clar neplauzibilă. A crede în justețea ei ar fi și mai naiv decît a crede în afirmația cu jurămînt a unui hoț că nu el v-a furat punga din buzunar, ci fluctuația moleculelor a făcut ca punga să treacă din buzunarul dv. în mîna sa. Și totuși, o astfel de fluctuație este de un număr inimaginabil de ori mai probabilă decît fluctuația pe scară universală de care a fost vorba mai înainte.

S-ar putea încerca să se obiecteze în modul următor. Să zicem că probabilitatea unei fluctuații de dimensiunile universului este infinit de mică, dar aceasta nu trebuie să ne mire, căci și eu — omul care analizează această problemă — sînt tot consecința unei fluctuații. Însăși existența mea este un eveniment absolut neprobabil și eu trebuie să apreciez ce este probabil sau neprobabil în raport cu mine însumi.

Și această obiecție trebuie respinsă.

Pentru existența noastră este mai mult decît suficient sistemul solar, iar noi vedem lumea în dezechilibru la o scară în comparație cu care sistemul nostru solar este o particulă infimă.

Încă de pe acum astronomii au pătruns, cu ajutorul telescoapelor, în adîncul universului la distanțe de 10^{12}—10^{13} ori mai

mari decît dimensiunile sistemului solar. Dacă universul ar fi o fluctuație, ar însemna că observăm stări de dezechilibru care depășesc scara necesară pentru viața noastră de cel puțin 10^{12} ori. De aceea existența noastră nu justifică nicidecum probabilitatea neînchipuit de mică a unei fluctuații care ar fi avut ca rezultat formarea universului în forma sa actuală.

Așadar, contradicția rămîne neștirbită. Aceasta înseamnă că concepțiile fundamentale despre spațiu și timp, precum și legile fundamentale pe care le socoteam pînă acum ca imuabile au undeva o deficiență. Undeva în fundamentul științei trebuie să se introducă o corecție.

Pentru a doua oară ne lovim de cusururile principiale ale mecanicii noastre. Acum însă am găsit un nou defect, care n-are legătură cu revizuirea noțiunilor despre a căror necesitate am amintit cînd am făcut cunoștință cu proprietățile neobișnuite ale heliului lichid. Acolo era vorba de inaplicabilitatea legilor mecanicii vechi la microparticule. Acum am descoperit defecte în fundamentul cunoștințelor noastre cînd încercăm să le aplicăm la tot universul.

Vechea mecanică devine improprie atît cînd este vorba de infinitul mic, cît și de infinitul mare.

Despre modificările care trebuie aduse în formularea de pînă acum a legilor naturii pentru a le putea aplica în unele cazuri la microcosmos, iar în altele, la tot universul, sperăm să stăm de vorbă cu cititorul mai tîrziu.

Cuprins

Prefață 5

I Noțiuni fundamentale 7

II Legile mișcării 28

III Mișcarea din punct de vedere „irațional" 52

IV Legile conservării 71

V Oscilațiile 94

VI Mișcarea corpurilor solide 110

VII Gravitația 137

VIII Presiunea 163

IX Cărămizile universului 182

X Structura materiei 196

XI Temperatura 215

XII Stările substanței 234

XIII Soluțiile 262

XIV Frecarea 276

XV Sunetul 292

XVI Energia în jurul nostru 331

Redactor resp. de carte : DINU IOANIȚIU NICHITA
Tehnoredactor : GHEORGHE POPOVICI

Dat la cules 29.10.1964. Bun de tipar 06.03.1965. Tiraj 20 000 +130 ex. legate 1/1+25 ex. lux. Hirtie scris II A 63 g/m². Format 54+84/16. Coli editoriale 22,42. Coli tipar 22,50. A. 15 760. Indici de clasificare zecimală : pentru bibliotecile mari 53, pentru bibliotecile mici 53.

Tiparul executat sub comanda nr. 40 874 la Combinatul Poligrafic „Casa Scînteii", Piața Scînteii nr. 1, București —R.P.R.

ERATĂ

Pag.	Rîndul	În loc de:	Se va citi:
22	Fig. 7	v_{fier} şi v_f	v_t
34	14 j.	Convorbire	Dialog
120	24	$l_1 = \frac{F_2}{F_1 + F_2}$, $l_2 = \frac{F_1}{F_1 + F_2}$	$l_1 = \frac{F_2 l}{F_1 + F_2}$, $l_2 = \frac{F_1 l}{F_1 + F_2}$
128	13 şi 14	v_1	$v_\perp$